



Carlos Manuel Figueroa Feio de Almeida

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Interação fluido/estrutura utilizando uma
formulação de Lagrange na discretização dos
elementos de fluido**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil –
Perfil de Estruturas

Orientador: João Carlos Gomes Rocha de Almeida, Professor Associado,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Nuno Miguel Monteiro Azevedo, Investigador Auxiliar, Departamento
de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Presidente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

Arguente: Doutor Sérgio Bruno Martins Oliveira

Vogal: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida

Fevereiro 2021

Carlos Manuel Figueroa Feio de Almeida

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Interação fluido/estrutura utilizando uma
formulação de Lagrange na discretização dos
elementos de fluido**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: João Carlos Gomes Rocha de Almeida, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Nuno Miguel Monteiro Azevedo, Investigador Auxiliar, Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Fevereiro 2021

Interação fluido/estrutura utilizando uma formulação de Lagrange na discretização dos elementos de fluido

“Copyright” Carlos Manuel Figueroa Feio de Almeida, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Depois de muito esforço e dedicação concluo a etapa final da minha vida académica com a presente dissertação. Este percurso teria sido bastante diferente sem algumas pessoas e, por isso, gostaria de agradecer em particular:

Ao meu orientador, Professor Doutor João Rocha de Almeida, pela oportunidade única que me proporcionou de poder realizar esta dissertação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e por toda a sua boa disposição e disponibilidade ao longo do processo de elaboração desta dissertação.

Ao meu co-orientador, Doutor Nuno Monteiro Azevedo, por toda a disponibilidade e simpatia, pela vontade de sempre querer fazer mais e melhor, por partilhar comigo o módulo computacional utilizado nos estudos realizados nesta dissertação e pelo esclarecimento de quaisquer dúvidas que me surgissem.

À Doutora Maria Luísa Braga Farinha, pela sua boa disposição e por todo o material de estudo que forneceu para proporcionar uma melhor compreensão dos temas estudados e abordados ao longo da dissertação.

À Magda, pela companhia e por toda a motivação ao longo do curso.

Ao Júlio e ao André, por estarem sempre presentes e disponíveis para o que for preciso.

À Inês, o melhor que me aconteceu nos últimos anos, pelo seu amor, carinho e afeto incondicional.

Aos meus irmãos, João e Filipa, pela relação única que temos, e por todo o apoio e carinho demonstrados ao longo de toda a minha vida.

Por último, agradeço aos meus pais, a razão do meu ser e a minha maior fonte de inspiração, pelos valores transmitidos e por tudo o que fizeram por mim. Obrigado.

RESUMO

Neste trabalho avalia-se o desempenho de uma formulação de Lagrange de elementos finitos em deslocamentos na modelação da interação hidrodinâmica que ocorre entre a albufeira e o conjunto barragem-fundação. Utiliza-se o módulo computacional Parmac3D-Fflow que permite a análise da interação hidrodinâmica com base em algoritmos de solução de natureza explícita (método das diferenças centrais) e implícita (método de Newmark). Apresentam-se os fundamentos necessários para a compreensão do comportamento hidrodinâmico de barragens gravidade e abóbada e dos modelos de cálculo adotados.

É analisada a interação barragem-albufeira considerando que o corpo da barragem apresenta uma aceleração constante no tempo. São analisadas duas barragens gravidade genéricas, uma com o paramento de montante vertical e outra com o paramento de montante inclinado, para diferentes valores de inclinação, e uma barragem abóbada. Neste estudo procurou-se avaliar a importância de diversos parâmetros. As distribuições de pressão hidrodinâmicas obtidas no paramento de montante são comparadas com a solução proposta por Westergaard, para os casos da barragem gravidade de paramento vertical e da barragem abóbada, e com a solução proposta por Zangar para o caso da barragem gravidade de paramento inclinado.

Por fim, foram desenvolvidos dois modelos numéricos da barragem gravidade de Pine Flat e três modelos numéricos da barragem abóbada do Alto Lindoso, de forma a avaliar o comportamento dos elementos finitos adotados sob vibração forçada. Para a barragem do Alto Lindoso foi analisada a influência de diversos parâmetros. Os resultados apresentados mostram que é possível aplicar modelos de fluido com base em deslocamentos no estudo dinâmico de barragens gravidade e que em barragens abóbada é necessário considerar uma malha muito refinada na zona junto ao paramento de montante. Verifica-se ainda que o termo de penalização deverá ser adotado com algum cuidado.

Palavras-chave: Formulação de Lagrange, análise hidrodinâmica, interface albufeira/barragem, elementos finitos

ABSTRACT

This work evaluates the performance of a Lagrange formulation of finite elements in displacements for modeling the hydrodynamic interaction that occurs between the reservoir and the assembly dam-foundation. The study is developed using the Parmac3D-Fflow computational module which allows the analysis of hydrodynamic interaction based on algorithms of explicit nature solution (method of centered differences) and implicit (Newmark method). The fundamentals for understanding the hydrodynamic behavior of gravity and arch dams and the calculation models adopted are presented.

The dam-reservoir interaction is analyzed considering that the body of the dam presents a constant acceleration over time. Two generic gravity dams are analyzed, one with a vertical upstream face and the other with an inclined upstream face, for different slope values. An arch dam is also considered. This study aimed to evaluate the importance of several parameters. The hydrodynamic pressure distributions obtained at the upstream face of the dam are compared with the solution proposed by Westergaard, for the cases of the gravity dam with a vertical upstream face and the arch dam, and with the solution proposed by Zangar for the case of the gravity dam with an inclined upstream face.

Finally, two numerical models of the Pine Flat gravity dam and three numerical models of the Alto Lindoso arch dam were developed in order to evaluate the behavior of the adopted finite elements under forced vibration. For the Alto Lindoso dam, the influence of several parameters was also analyzed. The results presented show that it is possible to apply fluid models based on displacements in the dynamic analysis of gravity dams and that in arch dams it is necessary to consider a very refined mesh close to the upstream face of the dam. It is also verified that special care must be taken with the penalty term adopted.

Keywords: Lagrange formulation, hydrodynamic analysis, reservoir/dam interface, finite elements

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Objetivos e metodologia	2
1.3	Organização da dissertação	3
2	COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS DE BETÃO5	
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Barragens de betão	6
2.2.1	Classificação de barragens	6
2.2.2	Segurança de barragens	8
2.2.2.1	Segurança estrutural	8
2.2.2.2	Segurança operacional	9
2.2.2.3	Monitorização de segurança.....	9
2.2.2.4	Plano de emergência	10
2.2.3	Barragens gravidade	11
2.2.4	Barragens abóbada	12
2.3	Caracterização estrutural sob ações dinâmicas	13
2.3.1	Ação sísmica no dimensionamento de uma barragem.....	13
2.3.2	Ensaio de vibração forçada e ensaios de vibração ambiente.....	14
3	INTERAÇÃO DINÂMICA FLUIDO/ESTRUTURA	17
3.1	Considerações iniciais	17
3.2	Modelo sólido.....	18
3.2.1	Método das diferenças centrais	18
3.2.2	Método de Newmark	21
3.2.3	Elementos de interface	22
3.2.4	Amortecimento de Rayleigh.....	24
3.3	Modelo de fluido	25
3.3.1	Formulação de Lagrange de um fluido.....	25
3.3.1.1	Equações de movimento de um fluido	25
3.3.1.2	Modos de circulação	26
3.3.1.3	Elementos estudados baseados na formulação de Lagrange	27

4 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO ADOTADO NO PROGRAMA PAR MAC3D-FFLOW.....31

4.1	Considerações iniciais	31
4.2	Barragem gravidade de paramento vertical	32
4.2.1	Propriedades mecânicas.....	32
4.2.2	Geometria e condições de apoio.....	32
4.2.3	Modelo numérico	33
4.2.4	Primeiro estudo – Diferentes espessuras da barragem	34
4.2.5	Segundo estudo – Regularidade da malha.....	37
4.2.6	Terceiro estudo – Aumento do número de elementos em altura, mantendo a geometria dos elementos	38
4.2.7	Quarto estudo – Geometria dos elementos.....	40
4.2.8	Quinto estudo – Discretização da malha junto ao paramento vertical da barragem.....	42
4.3	Barragem gravidade de paramento inclinado	44
4.3.1	Propriedades mecânicas.....	44
4.3.2	Geometria e condições de apoio.....	44
4.3.3	Modelo numérico	44
4.3.4	Primeiro estudo – Validação dos elementos estudados	45
4.3.5	Segundo estudo – Regularidade da malha.....	47
4.3.6	Terceiro estudo – Aumento do número de elementos em altura, mantendo a geometria dos elementos	48
4.3.7	Quarto estudo – Geometria dos elementos.....	50
4.3.8	Quinto estudo – Discretização da malha junto ao paramento inclinado da barragem..	52
4.4	Barragem abóbada - Barragem do Alto Lindoso.....	55
4.4.1	Propriedades mecânicas.....	55
4.4.2	Geometria e condições de apoio.....	56
4.4.3	Modelo numérico	57
4.4.4	Primeiro estudo – Validação dos elementos estudados	58
4.4.5	Segundo estudo – Comparação das pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C entre as malhas <i>e</i> e <i>f</i>	59

5 MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO EM VIBRAÇÃO FORÇADA DA BARRAGEM GRAVIDADE PINE FLAT E DA BARRAGEM ABÓBADA DO ALTO LINDOSO61

5.1	Considerações iniciais	61
5.2	Barragem de Pine Flat	62
5.2.1	Propriedades mecânicas.....	63
5.2.2	Geometria e condições de apoio.....	64
5.2.3	Modelo numérico	65
5.2.4	Frequências próprias.....	65
5.3	Barragem do Alto Lindoso	67
5.3.1	Propriedades mecânicas.....	68
5.3.2	Geometria e condições de apoio.....	69
5.3.3	Modelo numérico	70
5.3.4	Frequências próprias.....	70
5.3.5	Rigidez dos elementos de interface	74
5.3.6	Variação do amortecimento de Rayleigh.....	75
5.3.6.1	Amortecimento de Rayleigh com componente de massa e de rigidez	76
5.3.6.2	Amortecimento de Rayleigh apenas com componente de massa.....	78
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
6.1	Aspetos relevantes dos estudos efetuados	81
6.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXO I - SOLUÇÃO DE WESTERGAARD PARA A DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES HIDRODINÂMICAS NUMA BARRAGEM DE PARAMENTO VERTICAL.....	89
	Solução exata de Westergaard.....	89
	Solução aproximada de Westergaard	90
	Comparação entre as soluções exata e aproximada de Westergaard.....	91
	ANEXO II - SOLUÇÃO DE ZANGAR PARA A DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES HIDRODINÂMICAS NUMA BARRAGEM DE PARAMENTO INCLINADO.....	93
	ANEXO III – VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PARMAC3D-FFLOW.....	95
	Consola.....	95
	Pórtico – Avaliação dos elementos de interface.....	102

Análise hidrostática	112
----------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Barragem gravidade de Pine Flat (fonte: https://www.spk.usace.army.mil/Media/Images.aspx?igphoto=2000748719)	11
Figura 2.2 - Barragem abóbada do Alto Lindoso (fonte: https://valemals.pt/vlm/a-licao-esquecida/)	12
Figura 3.1 – Ciclo de cálculo do modelo mecânico	19
Figura 3.2 - Interação entre dois elementos hexaédricos de 8 nós através de um elemento de interface	23
Figura 3.3 - Amortecimento crítico de Rayleigh.....	25
Figura 3.4 – Elementos finitos estudados.....	29
Figura 4.1 - Geometria do exemplo da barragem de paramento vertical	33
Figura 4.2 - Malhas adotadas de diferentes fatias: barragem gravidade de paramento vertical	34
Figura 4.3 - História de pressões hidrodinâmicas para uma barragem gravidade de paramento vertical com 10 metros de espessura.....	35
Figura 4.4 - Comparação das pressões hidrodinâmicas obtidas numa barragem gravidade de paramento vertical com espessuras de 10 e 100 m, com a solução de Westergaard	36
Figura 4.5 - Malha irregular adotada para barragem gravidade de paramento vertical.....	37
Figura 4.6 - Comparação das pressões hidrodinâmicas com uma malha regular e uma malha irregular, para diferentes elementos.....	38
Figura 4.7 - Malhas regular e irregular com 10 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem	39
Figura 4.8 - Malhas regular e irregular com 20 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem	39
Figura 4.9 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares e malhas irregulares com 10 e 20 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem	40
Figura 4.10 - Malha regular com 20 elementos em altura (comprimento de cada elemento igual ao dobro da altura)	41

Figura 4.11 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para as malhas regulares de elementos cúbicos e de elementos distorcidos.....	41
Figura 4.12 - Malha regular com elementos cúbicos junto ao paramento vertical.....	42
Figura 4.13 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e malhas regulares com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento vertical da barragem.....	43
Figura 4.14 - Comparação das pressões hidrodinâmicas em elementos de uma malha regular com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento vertical da barragem	43
Figura 4.15 - Geometria do exemplo de barragem gravidade de paramento inclinado.....	44
Figura 4.16 - Malha adotada para uma fatia de barragem gravidade de paramento inclinado – 15°	46
Figura 4.17 - História de pressões hidrodinâmicas numa barragem gravidade de paramento inclinado a 15°	46
Figura 4.18 - Malha irregular adotada para uma barragem gravidade de paramento inclinado a 15°	47
Figura 4.19 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para uma malha regular e uma malha irregular, para diferentes elementos numa barragem gravidade de paramento inclinado	48
Figura 4.20 - Malhas regular e irregular com 10 elementos em altura junto ao paramento inclinado da barragem a 15°.....	49
Figura 4.21 - Malhas regular e irregular com 20 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem a 15°	49
Figura 4.22 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares e irregulares com 10 e 20 elementos em altura junto ao paramento inclinado da barragem	50
Figura 4.23 - Malha regular com 20 elementos em altura (comprimento de cada elemento igual ao dobro da altura – 15°).....	51
Figura 4.24 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e de elementos distorcidos.....	51
Figura 4.25 - Malha regular com elementos cúbicos junto ao paramento inclinado a 15°	52

Figura 4.26 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e malhas regulares com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento inclinado da barragem.....	53
Figura 4.27 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e para malhas regulares com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento inclinado da barragem	54
Figura 4.28 - Malha regular com elementos cúbicos junto ao paramento inclinado a 30°	54
Figura 4.29 – Comparação entre as distribuições de pressões hidrodinâmicas obtidas numericamente para os elementos V_2 e V_{2_edm} e as soluções de Zangar.....	54
Figura 4.30 - Malhas adotadas para a barragem do Alto Lindoso.....	55
Figura 4.31 - Malha e do conjunto fundação-barragem-reservatório	57
Figura 4.32 - Malha f do conjunto fundação-barragem-reservatório.....	57
Figura 4.33 - História de pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C do modelo da barragem do Alto Lindoso – malha e , elemento V_2	58
Figura 4.34 - História de pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C do modelo da barragem do Alto Lindoso – malha f , elemento V_2	59
Figura 4.35 - Pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C para as malhas e e f – elemento V_2	60
Figura 5.1 – Malhas adotadas para a barragem Pine Flat.....	62
Figura 5.2 – Malha regular do conjunto fundação-barragem-reservatório.....	64
Figura 5.3 – Malha irregular do conjunto fundação-barragem-reservatório	64
Figura 5.4 – Deslocamentos no ponto A, malha regular	66
Figura 5.5 – Deslocamentos no ponto A, malha irregular.....	66
Figura 5.6 - Malha adotada para a barragem do Alto Lindoso	67
Figura 5.7 - Malha g do conjunto fundação-barragem-reservatório (barragem do Alto Lindoso).....	70
Figura 5.8 - Malha h do conjunto fundação-barragem-reservatório (barragem do Alto Lindoso).....	70

Figura 5.9 - Malha i do conjunto fundação-barragem-reservatório (barragem do Alto Lindoso).....	70
Figura 5.10 - Deslocamentos no ponto B - medição experimental e solução de Westergaard	71
Figura 5.11 - Deslocamentos no ponto B: medição experimental e malha g com diferentes elementos	72
Figura 5.12 - Deslocamentos no ponto B: medição experimental e malha h com diferentes elementos	72
Figura 5.13 - Deslocamentos no ponto B: medição experimental e malha i com diferentes elementos	72
Figura 5.14 - Deslocamentos no ponto B (malha h): Variação da rigidez normal das interfaces do reservatório.....	75
Figura 5.15 - Deslocamentos no ponto B (malha h): estudo 1, elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}	77
Figura 5.16 - Deslocamentos no ponto B (malha h): estudo 2, elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}	78
Figura 5.17 - Deslocamentos no ponto B (malha h): elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm} , com amortecimento de Rayleigh apenas com componente de massa	79
Figura 5.18 - Deslocamentos no ponto B (malha h): elemento V_2 - Comparação entre amortecimento de Rayleigh apenas com componente de massa e amortecimento de Rayleigh com ambas as componentes para 0.5%	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classe da barragem.....	7
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do fluido	32
Tabela 4.2 -Propriedades mecânicas dos elementos de interface	32
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do fluido	56
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas dos elementos de interface	56
Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos materiais	63
Tabela 5.2 -Propriedades mecânicas dos elementos de interface	63
Tabela 5.3 - Propriedades mecânicas dos materiais	68
Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas dos elementos de interface	68
Tabela 5.5 - Frequências de pico e amplitudes para vários tipos de elemento e coeficientes de penalização - 1ª e 2ª frequências próprias	73

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da secção transversal [L^2]
c	velocidade acústica do fluido [LT^{-1}]; constante de amortecimento [-]
c_n	velocidade de propagação das ondas de pressão [LT^{-1}]
C	coeficiente de pressão [-]
C_m	coeficiente de pressão máxima [-]
E	módulo de elasticidade; módulo de Young [$L^{-1}MT^{-2}$]
F_i	forças nodais [LMT^{-2}]
F_i^1	forças internas [LMT^{-2}]
F_i^c	forças externas devidas ao contacto com blocos vizinhos [LMT^{-2}]
F_i^e	forças externas aplicadas no ponto nodal [LMT^{-2}]
G	módulo de distorção [$L^{-1}MT^{-2}$]
g	aceleração gravítica [LT^{-2}]
h	altura; altura da barragem [L]
I	momento de inércia [L^4]
k	módulo de elasticidade da água [$L^{-1}MT^{-2}$]
k_n	rigidez normal associada a elemento de interface [$L^{-2}MT^{-2}$]
k_s	rigidez tangencial associada a elemento de interface [$L^{-2}MT^{-2}$]
K_v	módulo de compressibilidade da água [$L^{-1}MT^{-2}$]
L	comprimento [L]
M_y	componente do momento interno resultante direccionado ao longo do eixo y [L^2MT^{-2}]
p	pressão do fluído [$M L^{-1} T^{-2}$]; força de rotação [MT^{-2}]; peso uniformemente distribuído [MT^{-2}]; carga aplicada [LMT^{-2}]
\hat{p}_x	força de rotação segundo x [LMT^{-2}]
\hat{p}_y	força de rotação segundo y [LMT^{-2}]

\hat{p}_z	força de rotação segundo z [LMT ⁻²]
P	força [LMT ⁻²]
t	tempo [T]; espessura do elemento de interface [L]
T	período de vibração [T]
U	deslocamento [L]
\dot{u}	velocidade [LT ⁻¹]
\ddot{u}	aceleração [LT ⁻²]
V	volume [L ³]
v	velocidade; velocidade de escoamento [LT ⁻¹]
\dot{v}_i	derivada da velocidade em ordem ao tempo [LT ⁻²]
$v_{k,k}$	derivada espacial da velocidade [T ⁻¹]
v_k	volume de um tetraedro [L ³]
v_n	velocidade na direção normal [LT ⁻¹]
x	cota [L]
w	peso volúmico da água [L ⁻² MT ⁻²]
y	cota; profundidade [L]
z	cota [L]; distância [L]
α	aceleração adimensional [-]
δ	deslocamento [L]
δ_{ij}	símbolo de Kronecker [-]
Δt	passo de cálculo [T]
$\bar{\lambda}$	coeficiente de penalização [-]
ρ	densidade; massa volúmica [L ⁻³ M]
σ	tensão [L ⁻¹ MT ⁻²]
ν	coeficiente de Poisson [-]
$\hat{\varepsilon}_{rx}$	rotação sobre eixo global x [-]

$\hat{\varepsilon}_{ry}$	rotação sobre eixo global y [-]
$\hat{\varepsilon}_{rz}$	rotação sobre eixo global z [-]
$\dot{\varepsilon}_{ij}^k$	taxa de deformação de um tetraedro [-]
$\dot{\varepsilon}_v^k$	deformação volumétrica [-]
$\dot{\eta}_{ij}^k$	taxa de deformação desviatória [-]
w	frequência [T ⁻¹]

LISTA DE SIGLAS

FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
ICOLD	Comissão Internacional de Grandes Barragens
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
RPB	Regulamento de Pequenas Barragens

LISTA DE ABREVIATURAS

3D	3 dimensões
8N-1PG	elemento cúbico de 8 nós e 1 ponto de Gauss
8N-EDM	elemento cúbico de 8 nós de discretização mista
NL	não linear

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

A interação fluido-estrutura é um tema bastante importante em engenharia civil, em especial na engenharia de barragens. A modelação da interação, sob excitações dinâmicas, do corpo da barragem com a albufeira é importante na análise do comportamento da barragem sob ações sísmicas, na modelação de ensaios de vibração forçada e na análise e interpretação da resposta da estrutura para ações ambientais (Gomes et al., 2016).

A possibilidade de retenção de água recorrendo a uma estrutura foi identificada desde logo pelas primeiras civilizações. A primeira barragem construída pelos egípcios, cerca de 2750 AC, foi com este mesmo intuito; no entanto, esta barragem colapsou poucos anos depois (Yang et al., 1999). A evolução do conhecimento e o desenvolvimento de novas tecnologias permitiu a definição de diferentes formas e a utilização de novos materiais na construção de barragens. As barragens atuais não têm o propósito único de retenção de água, usada para irrigação e abastecimento de populações, mas servem também para regularização de caudais nos rios, controlo de cheias, produção de energia elétrica e atividades recreativas.

Dado o crescimento da importância das barragens na sociedade, a sua segurança estrutural não pode ser negligenciada, já que uma eventual rotura pode ter consequências catastróficas, como a previsível perda de vidas humanas e elevados prejuízos económicos. O controlo da segurança destas estruturas é fundamental durante todas as fases da vida da obra, desde a fase de projeto até ao fim da vida útil da mesma. Tendo em conta o efeito das principais ações estáticas e dinâmicas e ainda os processos de deterioração dos materiais, é de extrema importância a utilização de sistemas de monitorização e métodos de observação do comportamento estrutural que permitam a automatização e o acompanhamento do controlo da segurança de forma contínua ao longo do tempo (Alegre, 2015). Por outro lado, é fundamental desenvolver modelos numéricos fiáveis, devidamente calibrados com base em resultados obtidos a partir de registos experimentais ou *in situ*, que representem adequadamente o comportamento das obras sob ações estáticas e dinâmicas, tais como ações sísmicas.

As ações sísmicas podem ser tidas em conta no dimensionamento de uma barragem utilizando coeficientes sísmicos de acordo com a inércia do betão e a inércia da água e recorrendo à fórmula

de Westergaard (Westergaard, 1931). Dada a importância da interação fluido-estrutura, tem havido um esforço no desenvolvimento de técnicas de elementos finitos para modelação de sistemas fluido-estrutura mais complexos. A realização de testes dinâmicos em modelos numéricos permitiu identificar aspetos importantes do comportamento dinâmico de barragens de betão. A observação dos modos de vibração e a determinação das frequências próprias de algumas barragens permitiram uma melhor compreensão do seu comportamento quando sujeitas a acelerações muito elevadas (Laginha et al., 1965; Câmara et al., 1995; Gomes et al., 2016; Oliveira & Alegre, 2019).

Os modelos numéricos permitem, não só a comparação com observações efetuadas em estruturas existentes ao longo da sua vida útil, no âmbito do controlo da segurança, mas também a elaboração de projetos de novas estruturas.

1.2 Objetivos e metodologia

Esta dissertação tem como objetivo a análise de diferentes tipos de elementos finitos na interação entre a albufeira e a barragem, utilizando uma formulação de Lagrange na modelação do fluido.

De forma a utilizar os melhores modelos de fluido, foram testados vários modelos em dois exemplos genéricos distintos: uma barragem gravidade de paramento vertical e uma barragem gravidade com paramento inclinado, onde se variou a inclinação do paramento para verificar até que inclinações o modelo apresenta bons resultados.

Nestes modelos procurou-se estudar a importância:

- i. do refinamento da malha;
- ii. da regularidade da malha;
- iii. do tipo de elemento finito adotado;
- iv. da geometria do elemento finito;
- v. do refinamento da malha na zona mais próxima da barragem;
- vi. do coeficiente de penalização adotado.

Assim, numa primeira fase, as distribuições de pressões hidrodinâmicas obtidas numericamente para cada hipótese de comportamento foram comparadas com soluções já conhecidas: no caso da barragem gravidade de paramento vertical, a solução de Westergaard, e no caso da barragem gravidade de paramento inclinado, a solução de Zangar. Nos Anexos I e II deste trabalho são apresentadas, de forma sucinta, ambas as soluções. No Anexo III são ainda apresentados dois exemplos de verificação e validação do módulo de análise utilizado nesta dissertação. Tirando partido das conclusões retiradas dos modelos anteriores, avaliou-se a distribuição de pressões num paramento rígido correspondente ao paramento de montante de uma barragem abóbada.

Numa segunda fase procedeu-se à análise dinâmica da barragem de Pine Flat e da barragem do Alto Lindoso, sob vibração forçada, onde se definiu, para uma dada gama de frequências, a função de transferência. Para as duas barragens, compararam-se os resultados numéricos obtidos com a discretização da albufeira com os resultados numéricos obtidos usando a hipótese simplificativa das massas associadas de Westergaard. No caso da barragem do Alto Lindoso, compararam-se os resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais para o mesmo nível da albufeira (Câmara et al., 1995). Por fim, foi efetuado um estudo paramétrico de modo a aferir a influência do amortecimento de Rayleigh e da rigidez dos elementos de interface do reservatório na resposta dinâmica da estrutura sob ações dinâmicas.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, descritos resumidamente, de seguida:

- i. O primeiro capítulo, que corresponde ao capítulo atual, apresenta o tema abordado no decorrer da dissertação e os objetivos da mesma;
- ii. O segundo capítulo apresenta uma introdução aos diferentes tipos de barragens abordados nesta dissertação, assim como uma breve referência ao seu comportamento dinâmico;
- iii. O terceiro capítulo apresenta os fundamentos teóricos e práticos relativos ao estudo da interação dinâmica entre a barragem e a albufeira;
- iv. O quarto capítulo apresenta os estudos de verificação e validação dos modelos hidrodinâmicos adotados, com resultados teóricos e experimentais;
- v. O quinto capítulo apresenta dois modelos numéricos da barragem de Pine Flat e três modelos numéricos da barragem do Alto Lindoso, sob efeito de uma ação dinâmica, e ainda a correspondente análise crítica dos resultados obtidos;

- vi. Por último, o sexto capítulo apresenta as principais conclusões recolhidas e as perspectivas de futuros desenvolvimentos.

2 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS DE BETÃO

2.1 Considerações iniciais

A simulação do comportamento do sistema barragem-fundação-albufeira, sob ações estáticas e dinâmicas, deve ser feita recorrendo a modelos numéricos fiáveis e adequados, tendo como objetivo apoiar a atividade de controlo da segurança das obras em todas as fases. Este controlo de segurança assume uma importância cada vez maior em função tanto do aumento das exigências de segurança como do aumento dos conhecimentos específicos acerca deste tipo de obras, sendo de todo desejável evitar a ocorrência de acidentes, minimizando os riscos (Alegre, 2015).

Dentro das ações dinâmicas que uma barragem possa estar sujeita, o sismo é a mais condicionante.

Do ponto de vista da segurança de uma grande barragem, o sismo levanta legítimas preocupações, pois, como já foi referido, a ocorrência de algum efeito destrutivo decorrente desta ação pode ter consequências graves, resultantes da libertação súbita de grandes quantidades de água, podendo eventualmente ocasionar perdas humanas e materiais em zonas a jusante da barragem e não apenas no seu local de construção.

Este capítulo, tendo em conta que os exemplos estudados nesta dissertação incidem sobre barragens e a sua resposta a ações dinâmicas, pretende apresentar uma introdução dos diferentes tipos de barragem abordadas nesta dissertação, nomeadamente barragens gravidade e barragens abóbada. Aborda-se ainda o regulamento em vigor em Portugal relacionado com a classificação de uma barragem quanto à sua perigosidade e a caracterização estrutural de uma barragem sob ações dinâmicas.

2.2 Barragens de betão

2.2.1 Classificação de barragens

Uma barragem, por definição, é uma estrutura artificial construída em rios com o objetivo de reter água. De acordo com a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2020), uma barragem com altura igual ou superior a 15 metros desde a fundação ao coroamento ou uma barragem com uma altura entre 5 e 15 metros com capacidade de armazenamento superior a 3 milhões de metros cúbicos pode ser considerada como uma grande barragem.

As barragens podem ser classificadas relativamente ao seu material constituinte, existindo assim barragens de aterro (constituídas por terra ou rocha) e barragens de alvenaria e betão. De entre estas últimas, que constituem o objeto da presente dissertação, os principais tipos são:

- i. barragens gravidade (ver 2.2.3);
- ii. barragens abóbada (ver 2.2.4);
- iii. barragens de contrafortes, suportadas por vários elementos verticais, descontínuos, a jusante (contrafortes).

Em Portugal está atualmente em vigor o Decreto-Lei n° 21/2018, de 28 de março, que consiste num único diploma composto pelo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2018) e pelo Regulamento de Pequenas Barragens (RPB, 2018). O RSB aplica-se a grandes barragens, adotando uma definição ligeiramente diferente da assumida pela ICOLD: considera barragens de altura igual ou superior a 15 m, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até à cota do coroamento, ou barragens de altura igual ou superior a 10 m cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm³.

De acordo com o RSB (2018), a classificação das barragens é feita em função da sua perigosidade e dos danos potenciais associados à onda de inundação correspondente ao cenário de acidente mais desfavorável (Tabela 2.1).

A perigosidade da barragem é caracterizada pelo fator:

$$X = h^2 \sqrt{V} \quad (2.1)$$

onde h é a altura da barragem, em metros, e V a capacidade da albufeira, em hm^3 .

Os danos potenciais devem ser avaliados na região do vale a jusante da barragem, onde a onda de inundação pode afetar a população, os bens e o ambiente, devendo a população ser avaliada em função do número de edificações fixas com carácter residencial permanente (Y) e os danos potenciais serem avaliados tendo em consideração a existência de infraestruturas, instalações e bens ambientais importantes.

Tabela 2.1 - Classe da barragem

Classe	Perigosidade da barragem e danos potenciais
I	$Y \geq 10$ e $X \geq 1000$
II	$Y \geq 10$ e $X < 1000$ ou $0 < Y < 10$, independentemente do valor de X ou existência de infraestruturas, instalações e bens ambientais importantes
III	$Y = 0$, independentemente do valor de X

A região do vale a jusante deve ser delimitada pela secção do rio em que o caudal decorrente da rotura da barragem atinge a ordem de grandeza do caudal de dimensionamento do descarregador de cheias, sendo tal secção definida da seguinte forma:

- i. Com base em resultados obtidos por aplicação de modelos hidrodinâmicos ao estudo da onda de cheia, podendo também ser utilizados modelos simplificados ou fórmulas empíricas, se devidamente justificados;
- ii. Por uma secção do rio localizada 10 km a jusante da barragem, no caso de barragens com H igual ou menor que 15 m e X menor que 100.

Face ao potencial risco que as barragens envolvem, o controlo de segurança destas estruturas tem como objetivo o conhecimento da evolução do seu comportamento estrutural, para se tornar possível a deteção atempada de eventuais processos anómalos com vista à sua correção. De acordo com o RSB (2018), as atividades de observação e inspeção das barragens desenvolvem-se durante e no final da construção, antes e após o primeiro enchimento, e durante a sua exploração.

Em Portugal, nas grandes barragens de Classe I, está reservada ao LNEC uma intervenção de carácter complementar como consultor da Autoridade Nacional de Segurança de Barragens, atribuída à Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

2.2.2 Segurança de barragens

Os dois principais objetivos de qualquer metodologia de segurança consistem na minimização do maior número possível de riscos e na mitigação das consequências resultantes da eventual ocorrência de riscos não minimizados. De forma a alcançar estes objetivos, uma detalhada abordagem de segurança é aplicada às grandes barragens, incluindo os seguintes elementos chave (Wieland, 2014):

- (i) Segurança estrutural (principais aspetos: métodos de análise; critérios de projeto geológicos, hidráulicos e sísmicos; tais métodos e critérios podem ser sujeitos a alterações consoante novas regulamentações ou códigos que entrem em vigor).
- (ii) Monitorização de segurança da barragem (principais aspetos: instrumentação das barragens; manutenções periódicas feitas por técnicos especializados em barragens).
- (iii) Segurança operacional (principais aspetos: regras para funcionamento sob condições hidrológicas do reservatório normais ou extraordinárias; treino do pessoal responsável; manutenção de todas as estruturas e componentes da barragem).
- (iv) Plano de emergência (principais aspetos: planos de ação de emergência; mapas de inundação; sistemas de alarme; planos de evacuação).

Se todos os elementos de segurança listados acima forem satisfeitos, a barragem pode ser considerada como segura.

2.2.2.1 *Segurança estrutural*

A segurança estrutural é o principal pré-requisito para garantir um funcionamento seguro de uma barragem. A segurança estrutural de uma barragem deve ser verificada desde o início da sua fase de projeto, devendo respeitar os critérios definidos internacionalmente para riscos ambientais e riscos específicos do projeto e do local.

O dimensionamento de uma barragem deve ser realizado considerando que esta pode vir a ser sujeita ao pior cenário possível, como um sismo.

Antes de 1989, a ação sísmica era habitualmente modelada através de uma análise pseudo-estática, assumindo-se em geral um coeficiente sísmico igual a 0,1. Contudo, adotando este procedimento a combinação da ação sísmica não era normalmente a mais condicionante no dimensionamento de uma barragem. Com o desenvolvimento de novos métodos de análise dinâmica, o dimensionamento contra o sismo passou a ser mais rigoroso, de acordo com as diretivas emitidas em 2010 pela Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD) (Wieland, 2014).

2.2.2.2 Segurança operacional

Como mencionado acima, a segurança operacional incide no funcionamento sobre condições hidrológicas normais ou extraordinárias do reservatório, no treino do pessoal responsável e na manutenção da barragem. Apesar de frequentemente negligenciada, a manutenção é um elemento extremamente importante quanto à segurança a longo prazo de uma barragem.

2.2.2.3 Monitorização de segurança

As atividades de observação e inspeção das barragens têm por objetivos essenciais a avaliação das condições de segurança estrutural e do comportamento das obras, bem como a aferição dos critérios de projeto.

Estas atividades desenvolvem-se ao longo da vida das obras e compreendem, nomeadamente:

- i. o planeamento dos trabalhos;
- ii. a inspeção visual das obras;
- iii. a instalação, manutenção e exploração de um sistema de observação, constituído por dispositivos de medida das grandezas seleccionadas para o controlo do comportamento das obras, relativas às ações, às propriedades estruturais e às respostas das estruturas;
- iv. a compilação, análise e interpretação de toda a informação recolhida.

A inspeção das obras inclui, além das inspeções visuais de rotina, a realização de inspeções regulamentarmente previstas (RSB, 2018), isto é, inspeções conduzidas pela Autoridade, designadamente, durante e no final da construção, antes e após o primeiro enchimento da albufeira, e durante o período de exploração.

De acordo com o Documento Técnico de Apoio da Observação e Inspeção de Barragens (APA, 2018), o plano de observação é o documento em que se define e justifica o modo como deve ser efetuado o controlo de segurança estrutural das principais obras nas fases subsequentes à sua elaboração, tendo em consideração os principais cenários de acidente identificados para essas obras.

No que diz respeito à inspeção visual da barragem, esta divide-se em três tipos:

- i. Inspeções visuais de rotina;
- ii. Inspeções visuais de especialidade;
- iii. Inspeções de carácter excecional.

Estas inspeções visuais têm como objetivo essencial a deteção de sinais ou evidências de deterioração, comportamentos anómalos ou sintomas de envelhecimento da barragem e a deteção de anomalias do sistema de observação.

O sistema de observação é o conjunto de dispositivos instalados para medição das grandezas selecionadas para o controlo de segurança da obra, relativas às ações, às propriedades dos materiais e às respostas das estruturas e suas fundações.

2.2.2.4 Plano de emergência

Quando se concebe um plano de emergência, é assumido que a barragem pode falhar ou até mesmo ser destruída, e, por isso, o cenário de inundação é tido em conta. O principal objetivo de um plano de emergência é evitar a perda de vidas humanas, permitindo alertá-las e evacuá-las atempadamente. Os planos de evacuação têm como função ajudar o dono da barragem e os funcionários a minimizar as consequências de uma inundação decorrente da falha da barragem ou da libertação descontrolada de água do reservatório.

2.2.3 Barragens gravidade

As barragens gravidade funcionam como estruturas maciças em betão ou alvenaria e são caracterizadas por garantirem o equilíbrio recorrendo apenas ao seu peso próprio. Por norma, este tipo de barragens apresenta um traçado em planta reto ou com uma ligeira curvatura, e a secção transversal aproxima-se, em regra, a um triângulo onde a largura da base é aproximadamente 80% da altura (Figura 2.1). O corpo da barragem pode ser completamente preenchido ou vazado.

Estas barragens, quando construídas em betão convencional, são formadas por conjuntos de blocos monolíticos separados por juntas de contração transversais que se desenvolvem desde a fundação até ao coroamento. É de referir que as barragens gravidade podem ser construídas tanto em betão convencional como em betão compactado com cilindro, ou ainda com outro tipo de materiais, como alvenaria de granito ou xisto, ligada por argamassa (Alegre, 2015).



Figura 2.1 – Barragem gravidade de Pine Flat (fonte: <https://www.spk.usace.army.mil/Media/Images.aspx?igphoto=2000748719>)

Uma das ações mais importantes a considerar na estabilidade das barragens gravidade são as subpressões (pressões da água na base da barragem), dado que o sentido deste impulso é contrário ao peso próprio da barragem. As subpressões devem-se à percolação da água nas descontinuidades da fundação da barragem e variam com o tempo, com a qualidade do maciço rochoso e com a altura da coluna de água a montante e a jusante da barragem.

2.2.4 Barragens abóbada

Devido às enormes dimensões e quantidades de material necessário para a construção de uma barragem gravidade ou de aterro, surgiu uma nova solução de barragem em arco, inicialmente apenas com curvatura em planta. Mais tarde, começam a ser projetadas barragens abóbada de dupla curvatura (Figura 2.2), nos planos horizontal e vertical.

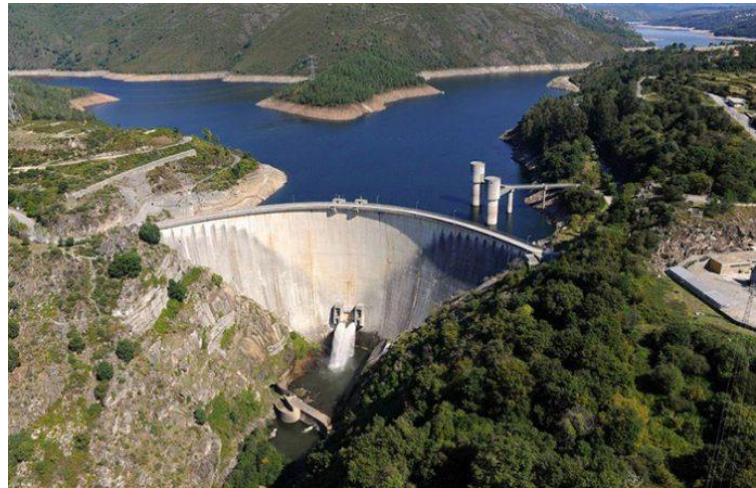


Figura 2.2 - Barragem abóbada do Alto Lindoso (fonte: <https://valemals.pt/vlm/a-licao-esquecida/>)

Os maciços rochosos de apoio para esta solução estrutural têm de ter boas características de resistência e de rigidez, dado que devem ser capazes de suportar os impulsos provenientes dos arcos. Estas estruturas são mais esbeltas que as barragens gravidade ou de aterro pois tiram vantagem da sua geometria, que permite aproveitar a boa capacidade resistente do betão à compressão, poupando assim material necessário à implementação destas soluções.

Os arcos das barragens abóbada podem ter diversas configurações, sendo as mais comuns as seguintes:

- i. arcos circulares de raio constante;
- ii. arcos circulares de ângulo constante;
- iii. arcos de raio variável;
- iv. arcos de três centros.

2.3 Caracterização estrutural sob ações dinâmicas

2.3.1 Ação sísmica no dimensionamento de uma barragem

Em muitas regiões do mundo, o sismo é a ação condicionante num projeto da estrutura de uma barragem. Em anos recentes, com o aumento das medições sismológicas disponíveis, particularmente perto do epicentro, os engenheiros de barragens têm sido confrontados com a necessidade de considerar maiores acelerações de pico nos seus dimensionamentos (Lemos & Gomes, 2007).

As seguintes ações sísmicas de projeto devem ser tidas em conta (Wieland, 2014; APA, 2018):

- i. Sismo máximo expectável (SME), que deve ser estimado por via determinística, sendo considerado como um sismo com um longo período de retorno;
- ii. Sismo máximo de projeto (SMP), que para grandes barragens deve ser estimado por via probabilística, com período de retorno igual a 10000 anos. Em obras de risco potencial elevado, este deverá ser considerado como sendo o SME, mas noutros casos poderá ter grandeza inferior;
- iii. Sismo base de projeto (SBP), menos intenso que o SMP, com um período de retorno fixado de acordo com o risco potencial envolvido.

O SME é o evento que produz o maior movimento esperado do solo no local da barragem, com base na história sísmica e na configuração sismo-tectónica da região (Wieland, 2016).

O SMP é o evento que produz o maior movimento do solo para o qual a barragem é dimensionada. É esperado que a barragem tenha um desempenho não catastrófico associado a este evento, não sendo admissível a libertação descontrolada do reservatório, embora sejam tolerados danos severos (USACE, 2003). Para estruturas críticas, é requerido que o SMP seja igual ao SME. Estruturas críticas, como muitas barragens, são aquelas cuja falha durante ou imediatamente após um sismo, possa resultar em perdas de vidas humanas (USACE, 2003).

As ações sísmicas são caracterizadas pela aceleração máxima no solo da componente horizontal e vertical do sismo, pelo espectro de resposta da aceleração horizontal e vertical do sismo,

normalmente para um amortecimento de 5% (correspondente ao material betão) e pela história da aceleração em função do tempo, também para as componentes horizontais e verticais do sismo.

2.3.2 Ensaios de vibração forçada e ensaios de vibração ambiente

Com o desenvolvimento dos modelos numéricos e dos equipamentos de ensaio é possível, através da realização de ensaios de vibração forçada ou da medição de ruído ambiente, estimar características mecânicas médias do betão da barragem com recurso a um modelo numérico calibrado.

Os ensaios de vibração forçada consistem na aplicação a uma estrutura de uma força com uma variação sinusoidal no tempo, perfeitamente conhecida. Esta ação vai provocar nas estruturas um movimento vibratório forçado com a mesma frequência de variação no tempo da força aplicada (embora desfasada) e com amplitudes que, para além da intensidade da força, dependem da sua frequência de aplicação e das frequências naturais de vibração da estrutura (Gomes et al., 2016).

Quando a frequência da ação se encontra na vizinhança das frequências naturais da estrutura, verifica-se um aumento da amplitude da resposta estrutural. É então possível identificar as frequências naturais da estrutura (quando se verificam os picos de amplitude) com base na medição da resposta sob a ação de uma força com uma variação sinusoidal no tempo, aplicada com diversas frequências.

As frequências naturais de cada estrutura dependem das suas propriedades geométricas e mecânicas e das ligações ao exterior, bem como do nível da albufeira. Assim, é possível determinar a evolução no tempo da sua deformabilidade média e, eventualmente, detetar e quantificar a evolução de um processo de deterioração dos materiais, através da realização de ensaios de vibração forçada em épocas sucessivas da vida útil das obras em que as restantes características estruturais se mantenham aproximadamente constantes (no caso de barragens de betão, em períodos onde as ações hidráulicas e térmicas sejam semelhantes) (Gomes et al., 2016).

Os ensaios de vibração ambiente permitem identificar os principais parâmetros modais, em particular as frequências naturais dos primeiros modos de vibração, sob excitação de baixa amplitude.

Os resultados obtidos através destes dois tipos de ensaios podem ser comparados entre si de forma a obter elementos experimentais que permitam melhorar a qualidade da análise espectral das várias séries temporais recolhidas (sob excitação forçada e ambiental).

3 INTERAÇÃO DINÂMICA FLUIDO/ESTRUTURA

3.1 Considerações iniciais

Quando um sólido e um fluido estão em contacto, ocorre uma interação com transmissão de forças e movimento relativo entre os dois meios. O estudo da interação dinâmica entre a albufera (fluido) e a barragem (estrutura), tem sido efetuado, maioritariamente, com recurso a três abordagens distintas (Wilson & Khalvati, 1983)(Azevedo et al., 2008)(Alegre et al., 2017):

- i. Formulação simplificada das massas associadas (Westergaard, 1931), onde é adicionada à interface do modelo estrutural da barragem uma parcela da massa do fluido. A pressão hidrodinâmica do fluido sobre a barragem é equivalente à parcela das massas associadas, onde a solução analítica simplificada se baseia numa estrutura rígida e num fluido incompressível. Esta abordagem é muito usada, dada a sua simplicidade, em especial para modelos baseados em soluções explícitas, apesar de ser reconhecido que a formulação simplificada das massas associadas é muito conservativa, devolvendo respostas sobrestimadas (Azevedo et al., 2008)(Azevedo et al., 2019).
- ii. Formulação de Lagrange, onde as incógnitas do modelo do fluido são definidas em termos de deslocamentos. A vantagem desta formulação reside na compatibilidade entre o modelo sólido e o modelo do fluido, dado ambos serem formulados em deslocamentos (Olson & Bathe, 1983). Dado o fluido ser modelado como um sólido com módulo de distorção zero, é necessário introduzir elementos na interface entre o fluido e o sólido de forma a permitir a interação apenas na direção normal. É igualmente necessário reduzir os modos de deformação de “hour-glass” e de circulação que estão associados ao facto de se estar a modelar um fluido como sendo um sólido com módulo de distorção zero, através de introdução de um coeficiente de penalização de forma a reduzir a influência destes modos (Wilson & Khalvati, 1983)(Calayir & Dumanoglu, 1993).
- iii. Formulação de Euler, onde as incógnitas do modelo do fluido são definidas em termos do valor da pressão. De forma a ser garantida a interação entre o fluido e o sólido, é necessário aplicar as pressões do fluido no sólido, e no fluido é necessário definir as condições de fronteira em termos de pressão. A desvantagem associada a este tipo de modelo deve-se ao facto de, ao contrário da formulação de Lagrange, a matriz de rigidez global não ser simétrica (Cervera et al., 1995), sendo pois necessário modificar os

programas de análise estrutural correntes. Por outro lado, este modelo apresenta a vantagem de ser numericamente mais robusto que o modelo de Lagrange.

Nos estudos apresentados nesta dissertação, foi aplicada a formulação de Lagrange nos elementos de fluido.

Nesta dissertação é utilizado um modelo hidromecânico descontínuo tridimensional tendo por base elementos finitos de interface. Este modelo é considerado no módulo computacional Parmac3D-Fflow, inicialmente desenvolvido para a análise da fratura em betão, tem sido utilizado para a análise do comportamento e da estabilidade de barragens de betão em situações estáticas e dinâmicas (Azevedo, 2003).

Este capítulo pretende descrever sucintamente o modelo mecânico utilizado, incluindo os esquemas de solução no tempo e o tipo de amortecimento adotado. Descreve-se igualmente de forma sucinta a formulação de Lagrange do fluido e os elementos finitos estudados nesta dissertação.

3.2 Modelo sólido

3.2.1 Método das diferenças centrais

O movimento dos pontos nodais é calculado usando um algoritmo explícito de solução no tempo (explicit time stepping algorithm). Este algoritmo deve ser consistente, preciso, eficiente e estável (Azevedo, 2003).

O método das diferenças centrais adotado no módulo computacional Parmac3D-Fflow é consistente, pois as expressões utilizadas tendem para as expressões diferenciais no limite de um passo infinitesimal. O método das diferenças centrais também pode ser considerado eficiente, pois otimiza o armazenamento necessário, desde que seja adequadamente implementado.

A estabilidade dum algoritmo explícito está relacionada com a propagação do erro com o tempo. Um método numérico é considerado estável quando um erro pequeno não aumenta durante a simulação. De modo a um método explícito ser considerado estável, é necessário definir o passo de tempo máximo permitido.

Para o método das diferenças centrais o passo de tempo máximo permitido (Δt_{crit}) é dado por (Azevedo, 2003):

$$\Delta t_{crit} = \min \frac{2}{w^{max}} (\sqrt{1 + \epsilon^2} - \epsilon) \quad (3.1)$$

onde w^{max} é a maior frequência circular do sistema estrutural sem amortecimento e ϵ a fração do amortecimento critico na frequência máxima.

Os elementos finitos representativos do meio sólido (conjunto barragem/fundação) seguem um modelo de natureza discreta que utiliza um algoritmo de solução explícito com base no método das diferenças centrais. Neste modelo é considerada a deformabilidade de cada bloco pertencente ao seu domínio através duma discretização interna com uma malha de elementos finitos tetraédricos/hexaédricos.

A Figura 3.1 apresenta o ciclo de cálculo do modelo mecânico em causa.

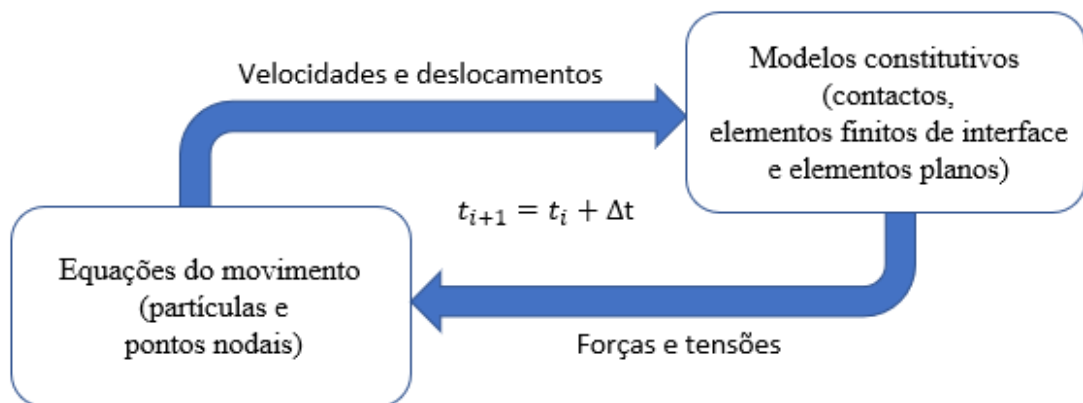


Figura 3.1 – Ciclo de cálculo do modelo mecânico

A equação do movimento de um dado ponto nodal ou partícula é dada por (Bathe & Wilson, 1976):

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (3.2)$$

onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez respetivamente, \mathbf{R} é o vetor das forças exteriores e $\ddot{\mathbf{U}}$, $\dot{\mathbf{U}}$ e \mathbf{U} são os vetores da assemblagem de elementos finitos, de aceleração, velocidade e deslocamentos, respetivamente. \mathbf{R} , que depende do tempo, pode ser escrito como:

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{F}_1(t) + \mathbf{F}_D(t) + \mathbf{F}_E(t) \quad (3.3)$$

onde $\mathbf{F}_1(t)$ são as forças de inércia, $\mathbf{F}_1(t) = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}$, $\mathbf{F}_D(t)$ são as forças de amortecimento, $\mathbf{F}_D(t) = \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}$, $\mathbf{F}_E(t)$ são as forças elásticas, $\mathbf{F}_E(t) = \mathbf{K} \mathbf{U}$.

Se a relação de equilíbrio (3.2) for considerada como um sistema de equações diferenciais com coeficientes constantes, então qualquer expressão de diferenças finitas que aproxime as acelerações e velocidades em termos do deslocamento pode ser usada.

Segundo o método das diferenças centrais, é assumido que

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2} \{U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t}\} \quad (3.4)$$

O erro proveniente de (3.4) é da ordem de $(\Delta t)^2$, e de forma a obter o mesmo erro na expressão da velocidade, é utilizado

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t} \{-U_{t-\Delta t} + U_{t+\Delta t}\} \quad (3.5)$$

A solução em deslocamentos para o instante $t + \Delta t$ é obtida considerando (3.2) no tempo t , ou seja:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{R}_t \quad (3.6)$$

Substituindo (3.4) e (3.5) em (3.6) obtém-se, a seguinte equação:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{R}_t - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{U}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{U}_{t-\Delta t} \quad (3.7)$$

que é possível resolver para $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$. É de notar que a solução de $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$ tem por base o uso das condições de equilíbrio para o tempo t ; $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$ é calculado usando (3.6). Por esta razão, o procedimento de integração é chamado de método de integração explícito, não requerendo uma factorização da matriz de rigidez na solução passo a passo.

O método explícito foi adotado através do módulo computacional Parmac3D-Fflow na análise comparativa com a solução teórica de Westergaard (Westergaard, 1931) e com a solução experimental de Zangar (Zangar, 1952).

3.2.2 Método de Newmark

O método de Newmark (Gavrea et al., 2005) é um dos métodos mais utilizados na dinâmica de estruturas para integração numérica de um conjunto linear de equações diferenciais de segunda ordem. Ao contrário do método das diferenças centrais, trata-se dum método de integração implícito, onde as condições de equilíbrio são consideradas no tempo $t + \Delta t$.

Segundo o método de Newmark, a equação do movimento é dada por:

$$[\mathbf{M}] \ddot{\mathbf{q}} + [\mathbf{C}] \dot{\mathbf{q}} + [\mathbf{K}] \mathbf{q} = \mathbf{F}(t) \quad (3.8)$$

As matrizes de massa, amortecimento e rigidez, $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$ e $[\mathbf{K}]$, respetivamente, são constantes e quadradas, a força \mathbf{F} depende do tempo t , e \mathbf{q} é o conjunto de coordenadas generalizadas usadas para representar a configuração do sistema mecânico.

As fórmulas de integração de Newmark dependem de dois parâmetros, β e γ :

$$\mathbf{q}_{n+1} = \mathbf{q}_n + \Delta t \dot{\mathbf{q}}_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)\ddot{\mathbf{q}}_n + 2\beta\ddot{\mathbf{q}}_{n+1}] \quad (3.9)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \dot{\mathbf{q}}_n + \Delta t [(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{q}}_n + \gamma\ddot{\mathbf{q}}_{n+1}] \quad (3.10)$$

Estas fórmulas são usadas para discretizar no tempo t_{n+1} as equações do movimento (3.8).

$$[\mathbf{M}]\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} + [\mathbf{C}]\dot{\mathbf{q}}_{n+1} + [\mathbf{K}]\mathbf{q}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} \quad (3.11)$$

A única combinação de β e γ que garante uma precisão de segunda ordem é $\beta = \frac{1}{4}$ e $\gamma = \frac{1}{2}$, obtendo-se assim um método estável e de segunda ordem.

Os aspetos positivos associados ao método de Newmark são:

- i. As equações diferenciais de segunda ordem que governam a evolução do sistema no tempo não têm que ser reduzidas à primeira ordem, o que leva a uma implementação mais simples e a uma dimensão menor do problema;
- ii. Boas propriedades de estabilidade e possibilidade de ajustar o nível de amortecimento introduzido no sistema;
- iii. O método tem sido testado e validado num vasto leque de problemas de engenharia.

O método de Newmark foi adotado através do módulo computacional Parmac3D-Fflow nas análises de vibração forçada, dado ser mais expedito que o método das diferenças centrais. Em problemas em que se admita comportamento elástico linear, como no caso das análises de vibração forçada, o método de integração implícita apresenta uma vantagem notória relativamente aos métodos explícitos. Na análise de problemas não lineares, como por exemplo na análise da uma barragem para o sismo máximo de projeto, os métodos de natureza explícita apresentam vantagens relativamente aos métodos implícitos, dado o passo de cálculo ter de ser reduzido para se poder modelar com rigor o comportamento do material no domínio não linear.

3.2.3 Elementos de interface

Na interface entre dois materiais distintos, tais como barragem/fundação, barragem/albufera e albufera/fundação, foram adotados elementos de interface. Nesta dissertação foram considerados

elementos de interface de 4 nós nos estudos das barragens, dado que foram utilizados elementos hexaédricos de 8 nós. No Anexo III apresenta-se um estudo com elementos hexaédricos de 20 nós e elementos de interface de 8 nós.

A utilização de elementos de interface é adequada à hipótese de pequenos deslocamentos que se verifica nos ensaios numéricos que se irá a modelar.

Estes elementos requerem que as malhas de elementos finitos de cada material sejam compatíveis, isto é, que as discretizações ao longo das faces das juntas em contacto sejam iguais. Dado que existe uma perfeita compatibilidade do campo de deslocamentos ao longo das interfaces, obtém-se também deste modo o campo de tensões ao longo das mesmas.

É importante referir que os pontos de integração coincidem com a posição dos nós do elemento de interface no plano médio, cujas coordenadas são dadas pela média das coordenadas dos pontos nodais dos blocos adjacentes de cada lado da interface.

Na Figura 3.2 encontra-se representada a interação entre dois blocos hexaédricos de 8 nós e o respetivo elemento de interface com pares de 4 nós.

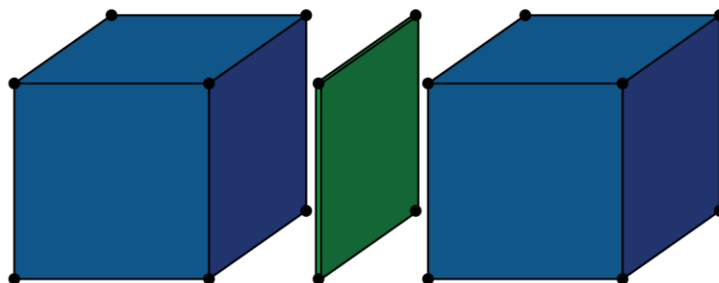


Figura 3.2 - Interação entre dois elementos hexaédricos de 8 nós através de um elemento de interface

Nos elementos de interface, admite-se uma rigidez normal e uma rigidez tangencial, que caracterizam a deformabilidade e que, de forma aproximada, são dadas por:

$$k_n = \frac{E}{L} \quad (3.12)$$

$$k_s = \frac{G}{L} \approx 0.4 k_n \quad (3.13)$$

onde L representa a espessura da interface, E o módulo de elasticidade e o G o módulo de distorção, que por sua vez se relaciona com o módulo de elasticidade através de:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (3.14)$$

onde ν representa o coeficiente de Poisson (aproximadamente 0,2-0,25 para betão).

3.2.4 Amortecimento de Rayleigh

Na análise dinâmica, o amortecimento de Rayleigh é geralmente adotado dada a sua simplicidade e dado o controlo que permite sobre as relações de amortecimento modal. Esta formulação apresenta dois coeficientes, um associado à matriz de massa, $[M]$, designado por α , e o outro associado à matriz de rigidez, $[K]$, designado por β . A matriz de amortecimento, $[C]$, é dada por:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (3.15)$$

Os coeficientes α e β podem ser definidos com base na definição de amortecimento crítico,

$$c_{cr} = 2 m \omega \quad (3.16)$$

onde c_{cr} é o amortecimento crítico, m a massa da estrutura e ω a frequência natural fundamental. Assim, o coeficiente de amortecimento é,

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega} + \beta \omega \right) \quad (3.17)$$

onde,

$$\alpha = \xi \omega = 2 \pi \xi f \quad (3.18)$$

$$\beta = \frac{2 \xi}{\omega} = \frac{1}{\pi} \frac{\xi}{f} \quad (3.19)$$

Nas Equações (3.18) e (3.19), ξ é o coeficiente de amortecimento e f a frequência.

Na Figura 3.3 é representado o amortecimento crítico de Rayleigh para cada frequência. É possível observar que para frequências baixas o termo do amortecimento relacionado com a massa tem grande influência na resposta modal. Nas frequências mais altas, o termo do amortecimento relacionado com a massa tem uma contribuição muito pequena.

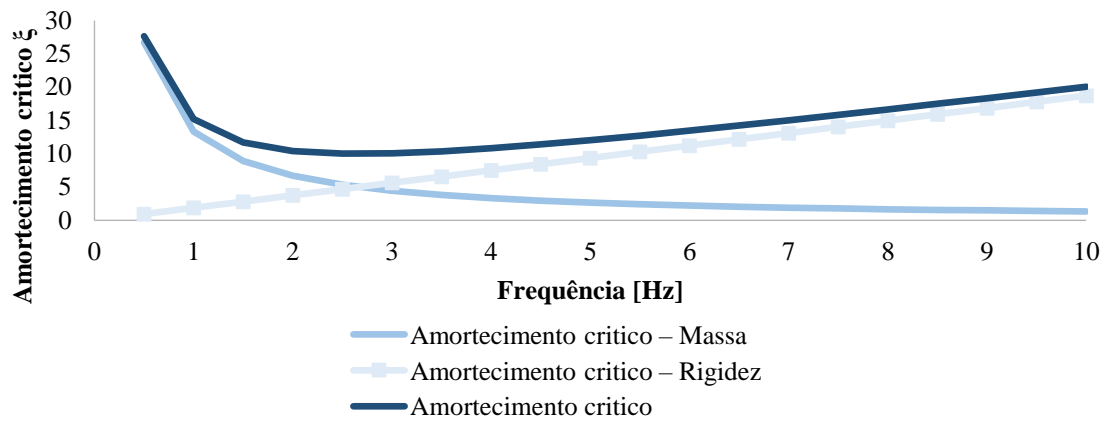


Figura 3.3 - Amortecimento crítico de Rayleigh

3.3 Modelo de fluido

3.3.1 Formulação de Lagrange de um fluido

3.3.1.1 Equações de movimento de um fluido

De forma a calcular as forças exercidas por um fluido em movimento, é necessário descrever matematicamente as equações dinâmicas do fluxo. A descrição do movimento é, por definição, a cinemática.

Segundo a formulação de Lagrange, para pequenas amplitudes de movimento o comportamento de um fluido não viscoso, linearmente elástico e irrotacional é dado pelas seguintes equações (Wilson & Khalvati, 1983):

$$p_i + \rho \dot{v}_i = 0 \quad (3.20)$$

$$\dot{p} + \rho c^2 v_{k,k} = 0 \quad (3.21)$$

Onde, p é a pressão do fluido, ρ é a densidade de massa do fluido, \dot{v}_i é a derivada da velocidade em ordem ao tempo, c é a velocidade acústica do fluido e $v_{k,k}$ é a derivada espacial da velocidade. Tendo em conta que as amplitudes de movimento do fluido são pequenas, as velocidades do fluido podem ser dadas pelas derivadas dos deslocamentos:

$$v_i = \dot{u}_i \quad (3.22)$$

Substituindo a Equação (3.22) na Equação (3.21) e integrando depois a equação resultante em ordem ao tempo, resulta:

$$p - \rho c^2 u_{k,k} = 0 \quad (3.23)$$

Diferenciando a Equação (3.23) em ordem à variável espacial e substituindo valores na Equação (3.20), obtém-se, por fim, a seguinte equação diferencial que rege o comportamento do fluido e onde as variáveis são os deslocamentos, como é pretendido na formulação de Lagrange:

$$p \ddot{u}_i - \rho c^2 u_{k,ki} = 0 \quad (3.24)$$

Num dado programa de elementos finitos, é possível obter de forma imediata a formulação básica de um elemento de fluido desde que se imponha que o material tenha um modulo de distorção nulo e se garanta que na fronteira do fluido só se transmitem forças normais à superfície. Assim, é necessário que na interface sólido-fluido existam elementos de junta (Azevedo et al., 2008).

3.3.1.2 Modos de circulação

Com o intuito de garantir que a deformação devida aos modos de circulação não ocorra no modelo numérico, atendendo a que o fluido é analisado como um meio sólido com módulo de

distorção nulo, uma das soluções é incluir um coeficiente de penalização no rotacional do campo de deslocamentos (Wilson & Khalvati, 1983):

$$\{\hat{p}_x \ \hat{p}_y \ \hat{p}_z\}^t = \bar{\lambda} \mathbf{K}_v \{\hat{\epsilon}_{rx} \ \hat{\epsilon}_{ry} \ \hat{\epsilon}_{rz}\}^t \quad (3.25)$$

onde \hat{p}_x , \hat{p}_y e \hat{p}_z são as forças de rotação, $\bar{\lambda}$ é o coeficiente de penalização, \mathbf{K}_v é o módulo de compressibilidade volumétrica, $\hat{\epsilon}_{rx}$, $\hat{\epsilon}_{ry}$ e $\hat{\epsilon}_{rz}$ são as rotações sobre os eixos globais x, y e z, respetivamente.

Este coeficiente de penalização $\bar{\lambda}$ tem de ser calibrado de forma a que os modos de rotação sejam impedidos, mas a resposta do modelo em pressões não seja alterada.

3.3.1.3 Elementos estudados baseados na formulação de Lagrange

Neste trabalho avaliou-se o desempenho dos seguintes elementos finitos:

- i. Elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss;
- ii. Elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros.

O elemento hexaédrico de 8 nós sub-integrado com um ponto de gauss (8N-1PG) é o elemento sólido tradicional que melhor aproxima a resposta do fluido (Azevedo & Câmara, 2015). O elemento hexaédrico de 8 nós de discretização mista (8N-EDM) é dado pela média do comportamento de duas sobreposições de 5 tetraedros independentes (Marti & Cundall, 1982). Para este elemento, em cada sobreposição, a deformação volumétrica considera-se como a média das deformações de cada tetraedro (Azevedo & Câmara, 2015):

$$\dot{\epsilon}_v^{sobreposição} = \frac{\sum_{k=1}^5 \dot{\epsilon}_v^k V^k}{\sum^5 V^k} \quad (3.26)$$

onde $\dot{\epsilon}_v^k$ e V^k são, respetivamente, a deformação volumétrica e o volume de cada tetraedro. As componentes da taxa de deformação de um tetraedro ($\dot{\epsilon}_{ij}^k$) são calculadas segundo:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^k = \dot{\eta}_{ij}^k + \frac{\dot{\epsilon}_v^{sobreposição}}{3} \delta_{ij} \quad (3.27)$$

onde $\dot{\eta}_{ij}^k$ é a taxa de deformação deviatórica de um dado tetraedro e δ_{ij} é o símbolo de Kronecker.

É sabido que o elemento (8N-EDM) apresenta boas respostas do fluido no caso de grandes deformações plásticas, evitando respostas muito rígidas (Lemos, 1999). Tendo isto em conta, prevê-se que este elemento também apresente bons resultados segundo a formulação de Lagrange. Quando é adicionado o coeficiente de penalização no rotacional dos deslocamentos, a taxa de rotação sobre cada eixo global é também dada como a média em cada sobreposição:

$$\hat{\epsilon}_v^{sobreposição} = \frac{\sum_{k=1}^5 \hat{\epsilon}_v^k V^k}{\sum^5 V^k} \quad (3.28)$$

Os coeficientes de penalização (molas que impedem a rotação), quando considerados, são aplicados nos pontos de Gauss. Como se pode ver no estudo hidrostático apresentado no Anexo III, estes coeficientes de penalização são fundamentais para se conseguir obter a distribuição de pressões correspondentes à solução estática.

Avaliou-se o desempenho dos dois elementos de referência para duas combinações de coeficientes de penalização. Assim, consideraram-se as seguintes situações:

- i. (V₁) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- ii. (V₂) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=0$;
- iii. (V_{1_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$, com elementos fictícios sobrepostos de 8 nós sem rigidez volumétrica e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- iv. (V_{2_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$.

Na Figura 3.4 são representados os elementos finitos estudados.

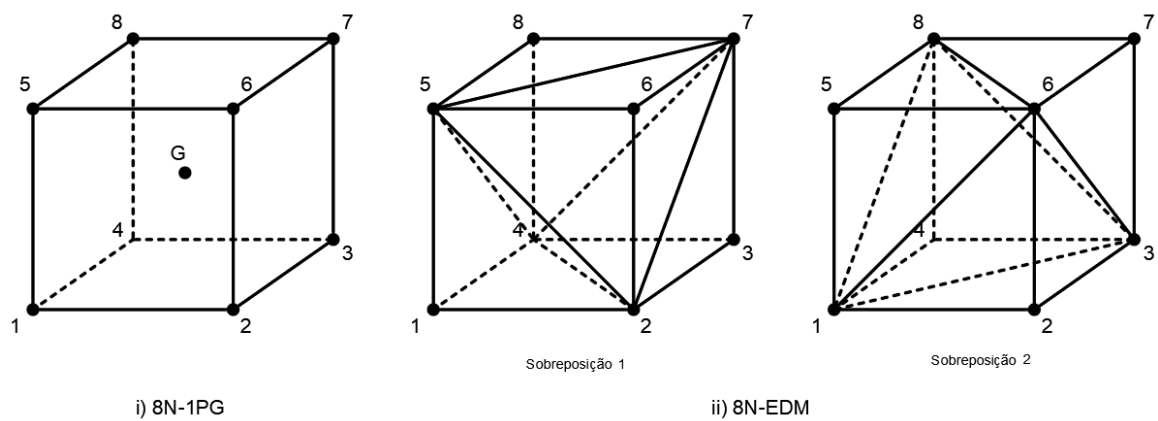


Figura 3.4 – Elementos finitos estudados

4 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO ADOTADO NO PROGRAMA PAR MAC3D-FFLOW

4.1 Considerações iniciais

De forma a verificar e validar o desempenho dos elementos de fluido em deslocamentos adotados nesta dissertação, foi avaliado, em primeiro lugar, se os modelos permitem obter a solução de pressões de Westergaard para um campo de acelerações constantes em altura atuando num paramento rígido, vertical, de altura h , ligado a uma albufera, ver Anexo I.

Numa segunda fase, foi avaliado se os elementos de fluido em deslocamentos adotados, com ou sem coeficiente de penalização, permitem estimar a distribuição de pressões num paramento rígido, inclinado, sujeito a um campo de acelerações constantes, comparando os resultados numéricos obtidos com a solução analítica e experimental proposta por Zangar, ver Anexo II.

Tal como referido nos objetivos da dissertação, nestes dois exemplos foram simulados diversos tipos de modelos numéricos, de forma a avaliar a importância:

- i. do refinamento da malha;
- ii. da regularidade da malha;
- iii. do tipo de elemento finito adotado;
- iv. da geometria do elemento finito;
- v. do refinamento da malha na zona mais próxima da barragem;
- vi. do coeficiente de penalização adotado.

Por fim, tirando partido das conclusões retiradas dos exemplos anteriores, avaliou-se a distribuição de pressões num paramento rígido correspondente ao paramento de montante de uma barragem abóbada, com a geometria aproximada da barragem do Alto Lindoso, sob um campo de acelerações constantes.

4.2 Barragem gravidade de paramento vertical

4.2.1 Propriedades mecânicas

Na Tabela 4.1 são apresentadas as propriedades mecânicas adotadas para os elementos de fluido e na Tabela 4.2 as propriedades mecânicas dos elementos de interface fluido/sólido adotadas nos modelos numéricos propostos.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do fluido

	Fluido
Módulo de compressibilidade K_v [GPa]	2,00
Massa volúmica ρ [ton/m ³]	1,00

Tabela 4.2 -Propriedades mecânicas dos elementos de interface

	Interfaces
	Fluido/Sólido
k_n [GPa/m]	2,0
k_s [GPa/m]	0

4.2.2 Geometria e condições de apoio

A Figura 4.1 representa a geometria do exemplo da barragem gravidade de paramento vertical, com 100 m de altura, 80 m de comprimento na base e 10 m de largura no coroamento. A albufera foi representada com 300 metros de comprimento na direção montante-jusante. No paramento vertical da barragem foi aplicado um campo de aceleração constante igual a -0.0001 m/s^2 , na direção x, e na outra extremidade do modelo, na mesma direção, de forma a verificar a condição de radiação, considerou-se a existência de amortecedores que aplicam na fronteira o seguinte campo de tensões (Azevedo et al., 2008):

$$t_n = -\rho c_n v_n \quad (4.1)$$

onde, ρ é a densidade de massa do fluido, c_n é a velocidade de propagação das ondas de pressão no fluido e v_n é a velocidade na direção normal na zona onde se define a condição de radiação. Nas restantes fronteiras foram impedidos os deslocamentos normais do fluido.

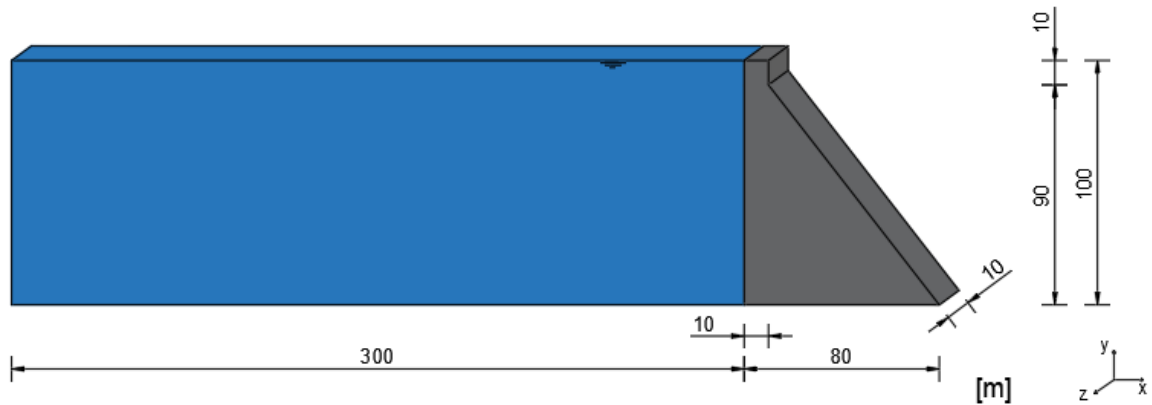


Figura 4.1 - Geometria do exemplo da barragem de paramento vertical

4.2.3 Modelo numérico

Nos modelos numéricos utilizados no programa Parmac3D-Fflow foram utilizados os elementos mencionados no capítulo 3.3.2:

- (V_1) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- (V_2) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=0$;
- (V_{1_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$, com elementos fictícios sobrepostos de 8 nós sem rigidez volumétrica e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- (V_{2_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$.

Tal como referido adotou-se um esquema de solução no tempo baseado no método das diferenças centrais.

Um primeiro estudo foi feito com o objetivo de comparar os resultados obtidos para diferentes espessuras representativas da barragem com 10 elementos cúbicos em altura junto ao paramento. Num segundo estudo, avaliou-se a importância da regularidade da malha também com 10 elementos cúbicos em altura. Num terceiro estudo os resultados obtidos no estudo anterior foram comparados com os resultados obtidos com uma análise de uma malha com 20 elementos cúbicos em altura. Num quarto estudo compararam-se os resultados obtidos para uma malha com 20 elementos cúbicos em altura, com uma malha com 20 elementos em altura, cujo comprimento é o dobro da altura e, por último, num quinto estudo, foi feita a comparação entre os resultados obtidos para 20 elementos cúbicos em altura, com uma discretização, de elementos cúbicos, feita apenas nos 40 metros mais próximos da barragem.

Todos os resultados obtidos foram comparados com a solução analítica proposta por Westergaard.

4.2.4 Primeiro estudo – Diferentes espessuras da barragem

Neste estudo foram analisados os elementos (V_1), (V_2), (V_{1_edm}) e (V_{2_edm}) numa malha de uma fatia da barragem com 10 metros de espessura e uma malha de 10 fatias da barragem cada uma com 10 metros de espessura, perfazendo 100 metros no total (Figura 4.2). De forma a verificar que as soluções obtidas se encontram em convergência, na Figura 4.3 apresentam-se as histórias das pressões hidrodinâmicas medidas em 10 nós ao longo do paramento vertical da barragem, com 100 m de altura e 10 m de espessura.

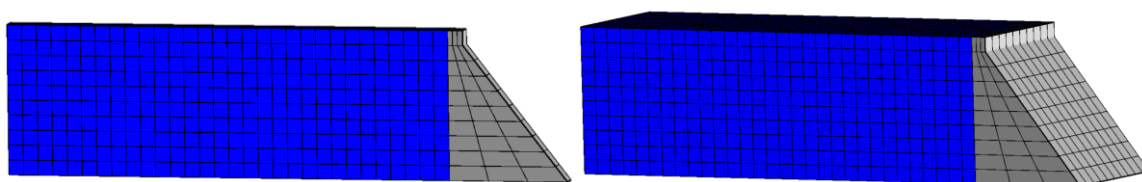


Figura 4.2 - Malhas adotadas de diferentes fatias: barragem gravidade de paramento vertical

Da análise da figura 4.3 verifica-se que todos os elementos de fluido e hipóteses de coeficiente de penalização ($\bar{\lambda}=1000K_v$ e $\bar{\lambda}=0$) conduzem a uma distribuição de pressões estável no paramento de montante da barragem.

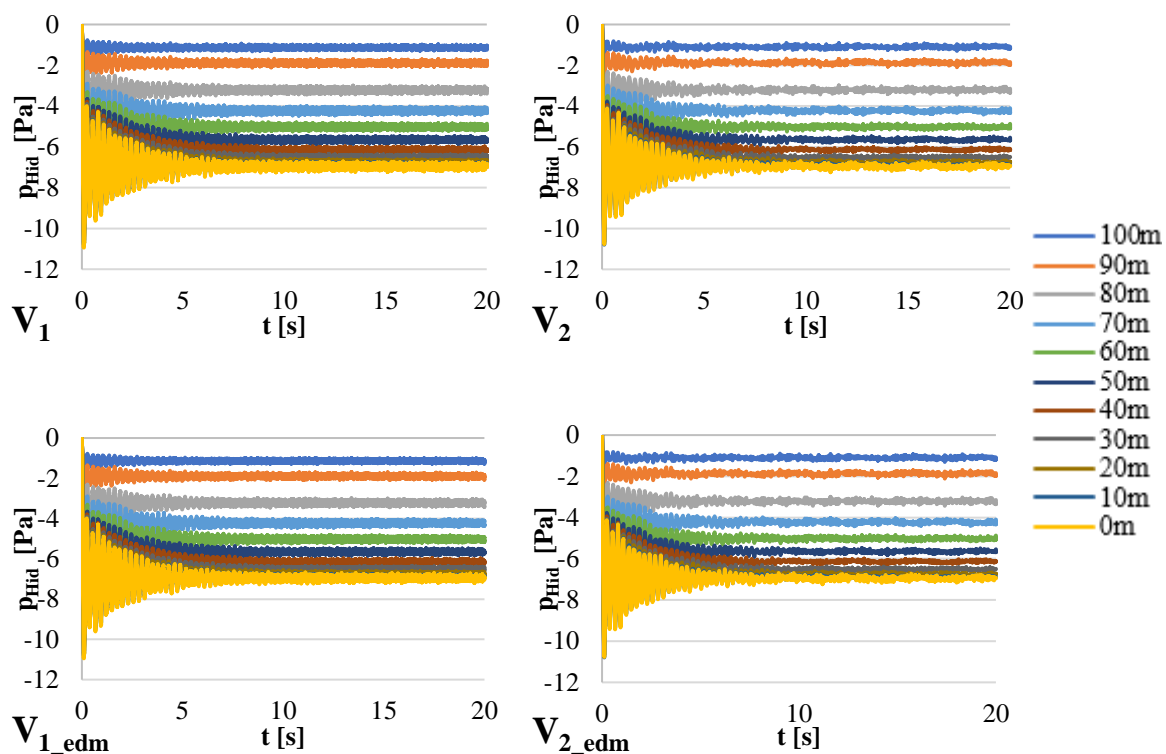


Figura 4.3 - História de pressões hidrodinâmicas para uma barragem gravidade de paramento vertical com 10 metros de espessura

Dado que as soluções obtidas apresentam resultados convergentes, na Figura 4.4 é apresentada a comparação com a solução proposta por Westergaard das distribuições de pressões hidrodinâmicas no paramento vertical da barragem para as duas espessuras estudadas, para os elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm} .

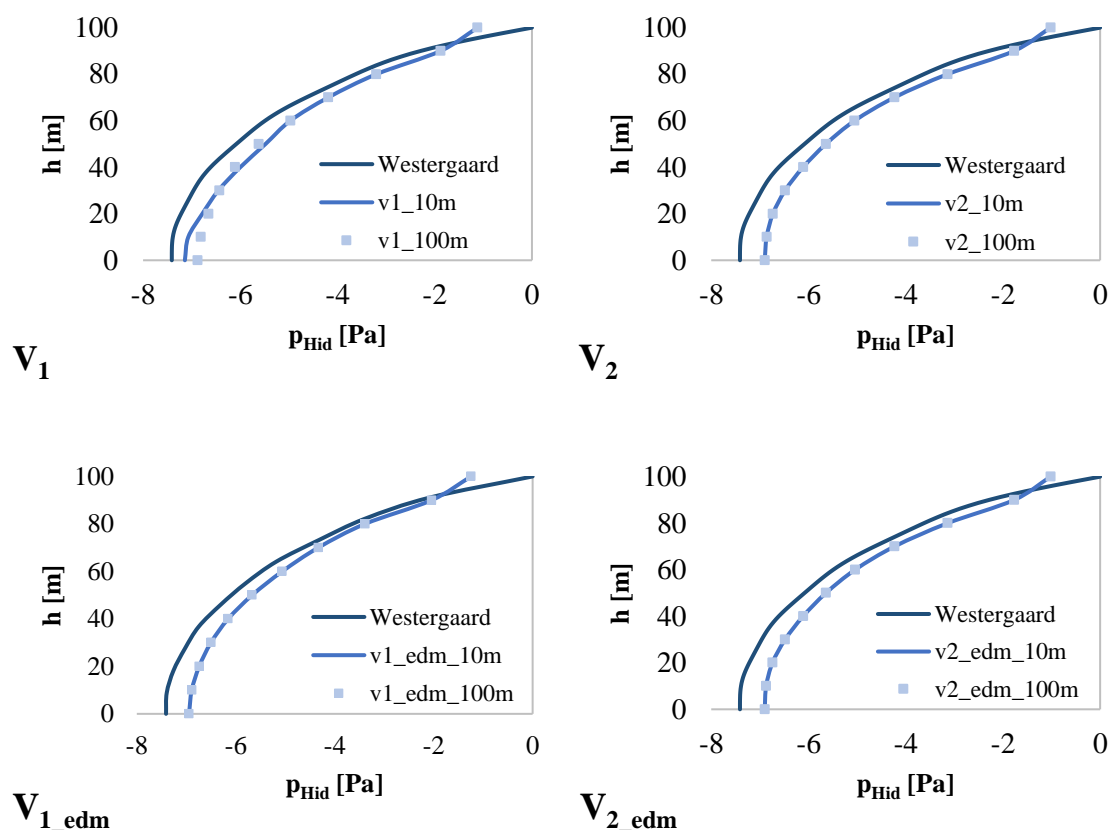


Figura 4.4 - Comparação das pressões hidrodinâmicas obtidas numa barragem gravidade de paramento vertical com espessuras de 10 e 100 m, com a solução de Westergaard

Comparando os resultados obtidos para as duas espessuras estudadas, à exceção do elemento (V_1), os resultados para diferentes espessuras são bastante próximos, pelo que se pode concluir que a utilização de apenas uma fatia como caracterização da barragem permite uma boa aproximação.

Esta conclusão é importante, pois quantas mais fatias o modelo da barragem possuir mais elementos terá, o que implica que o esforço computacional da análise será maior, o que não é desejável pois estes modelos são computacionalmente exigentes e importa minimizar esse esforço.

Da análise da Figura 4.4 verifica-se que, quer na base da barragem quer na zona próxima do coroamento, as distribuições de pressão são ligeiramente diferentes da distribuição proposta por Westergaard. Na superfície do fluido, a pressão hidrodinâmica obtida através do modelo não é igual a zero porque o valor da pressão hidrodinâmica do nó em causa é dado pela pressão do elemento mais próximo. Verifica-se igualmente que, para se obter uma resposta numérica próxima da proposta por Westergaard, não é necessário a inclusão do termo de penalização.

4.2.5 Segundo estudo – Regularidade da malha

Neste estudo, pretende-se avaliar a importância da regularidade da malha adotada no desempenho dos elementos de fluido. Foi então definida uma malha irregular (Figura 4.5) mantendo 10 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem, com o intuito de comparar os resultados obtidos com os resultados do estudo anterior. A Figura 4.6 apresenta a comparação das distribuições de pressões hidrodinâmicas entre os resultados obtidos para a malha irregular os obtidos anteriormente para a malha regular e a solução de Westergaard.

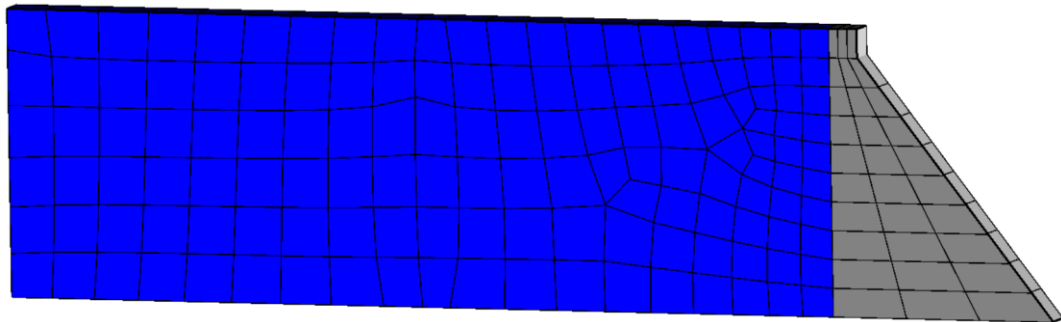


Figura 4.5 - Malha irregular adotada para barragem gravidade de paramento vertical

Da análise da Figura 4.6, verifica-se que a resposta do modelo numérico de malha irregular apresenta algumas diferenças relativamente à resposta obtida com um modelo de malha regular. No entanto, ambas as respostas representam uma boa aproximação da distribuição de pressões proposta por Westergaard.

De qualquer forma, verifica-se que os resultados obtidos com a malha regular apresentam uma curvatura mais consistente e próxima de uma parábola, em conformidade com a solução de Westergaard, o que indica que a regularidade da malha deve ser considerada na formulação de um bom modelo. Verifica-se também que, para se obter uma resposta numérica próxima da proposta por Westergaard, não é necessária a inclusão do termo de penalização, mesmo para uma malha irregular.

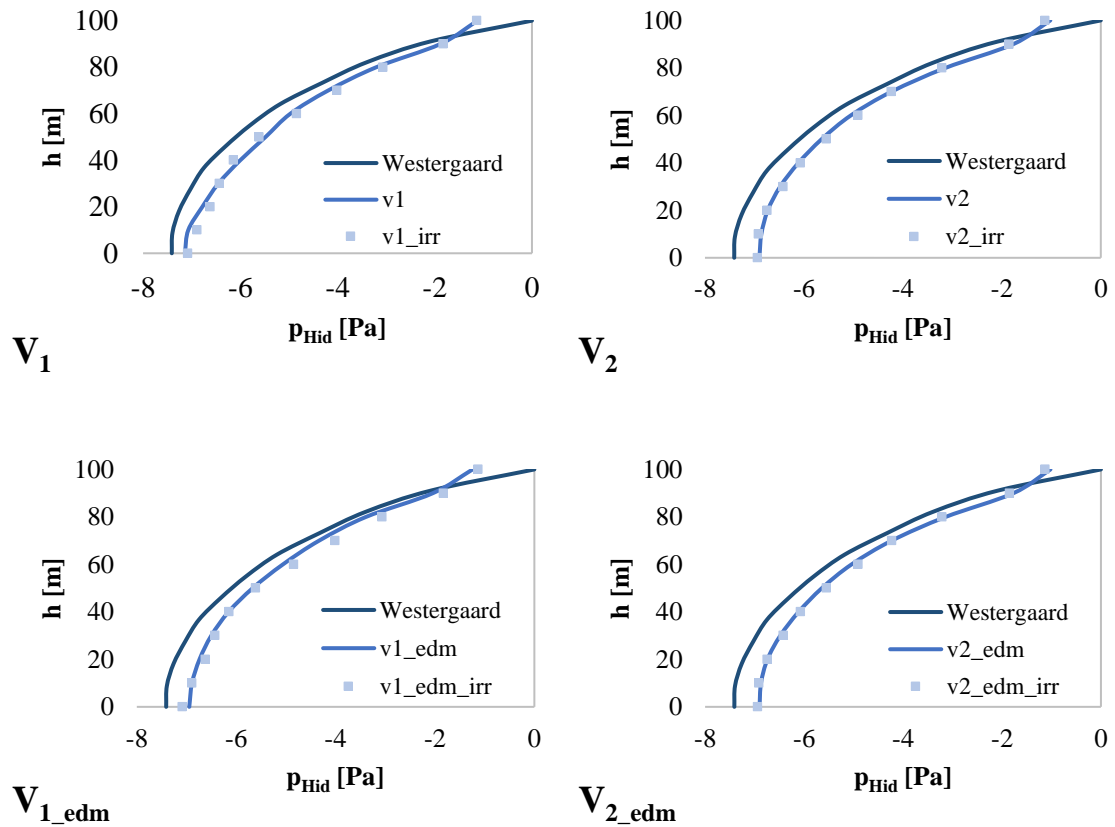


Figura 4.6 - Comparação das pressões hidrodinâmicas com uma malha regular e uma malha irregular, para diferentes elementos

4.2.6 Terceiro estudo – Aumento do número de elementos em altura, mantendo a geometria dos elementos

Neste estudo, pretende-se avaliar a importância de uma maior discretização em altura da malha de elementos finitos representativa do conjunto barragem-albufeira. Para tal, aumentou-se o número de elementos em altura, passando de 10 para 20 elementos junto ao paramento vertical da barragem e mantendo-se a geometria cúbica dos mesmos.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam as malhas regular e irregular para 10 e 20 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem, respetivamente. A comparação de pressões hidrodinâmicas entre estas malhas é apresentada na Figura 4.9.

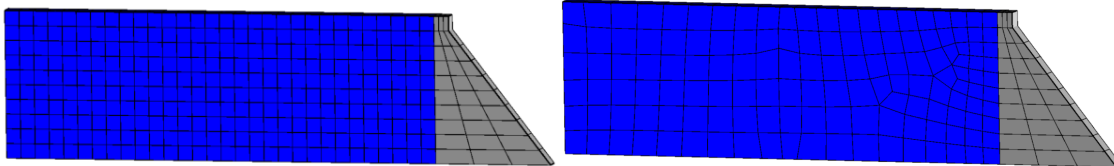


Figura 4.7 - Malhas regular e irregular com 10 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem

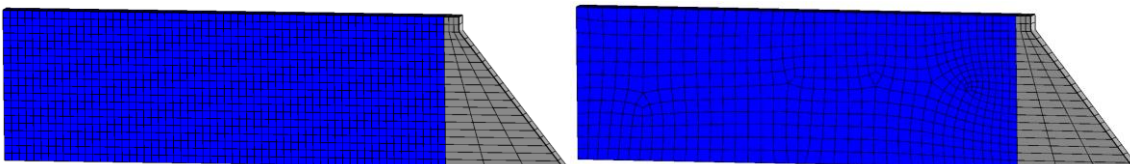


Figura 4.8 - Malhas regular e irregular com 20 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem

Da análise da Figura 4.9, verifica-se que com uma maior discretização da malha os resultados numéricos são mais aproximados da solução de Westergaard. Para as malhas regulares, os resultados obtidos na base do paramento são muito próximos da solução de Westergaard e no topo do paramento é possível observar que o valor obtido se aproxima do zero.

Verifica-se, portanto, que, com o aumento do número de elementos ao longo do paramento, a pressão hidrodinâmica calculada no nó do coroamento tende para zero e que a resposta numérica tende para a solução de Westergaard.

Nas malhas irregulares observa-se que a curva passa a ter um comportamento mais próximo de uma parábola para todos os elementos, e nos elementos (V_2) e (V_{2_edm}) observa-se na base do paramento uma aproximação à solução de Westergaard. Este estudo complementa o estudo anterior quanto à importância da regularidade da malha e mostra que uma maior discretização da malha pode melhorar substancialmente os resultados.

Os resultados numéricos obtidos com a malha irregular revelam que a introdução do fator penalizador que limita os modos de circulação pode ter um efeito contrário ao pretendido e sugerem que para malhas irregulares os coeficientes de penalização deverão ser limitados de forma a não alterarem a resposta do fluido.

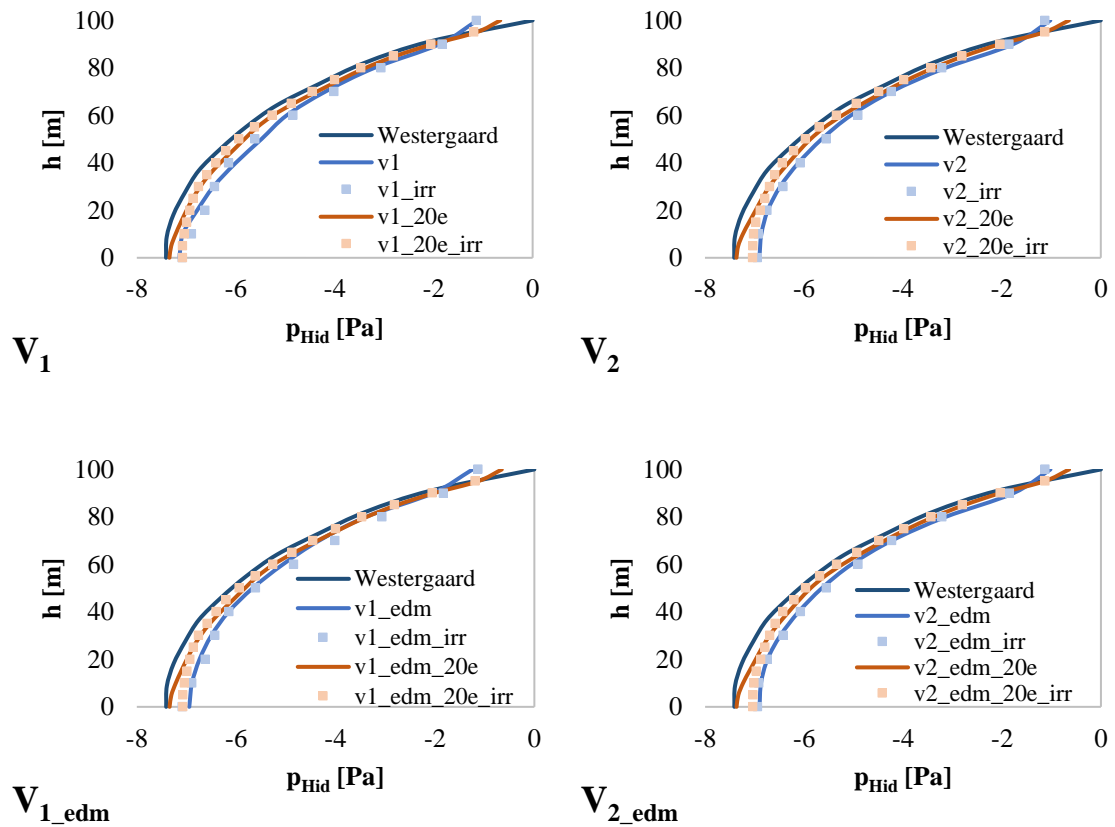


Figura 4.9 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares e malhas irregulares com 10 e 20 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem

4.2.7 Quarto estudo – Geometria dos elementos

Neste estudo, foram comparados os resultados obtidos usando uma malha regular com 20 elementos cúbicos em altura com uma nova malha (Figura 4.10), também com 20 elementos em altura mas cujo comprimento de cada elemento é o dobro da altura. A comparação dos resultados é apresentada na Figura 4.11.

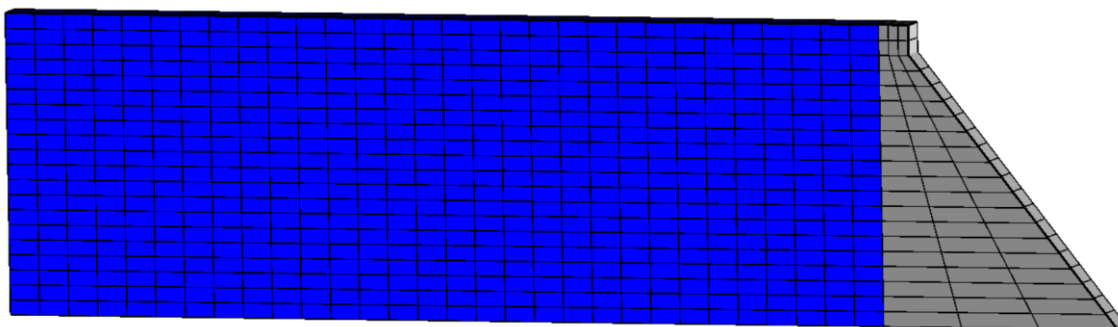


Figura 4.10 - Malha regular com 20 elementos em altura (comprimento de cada elemento igual ao dobro da altura)

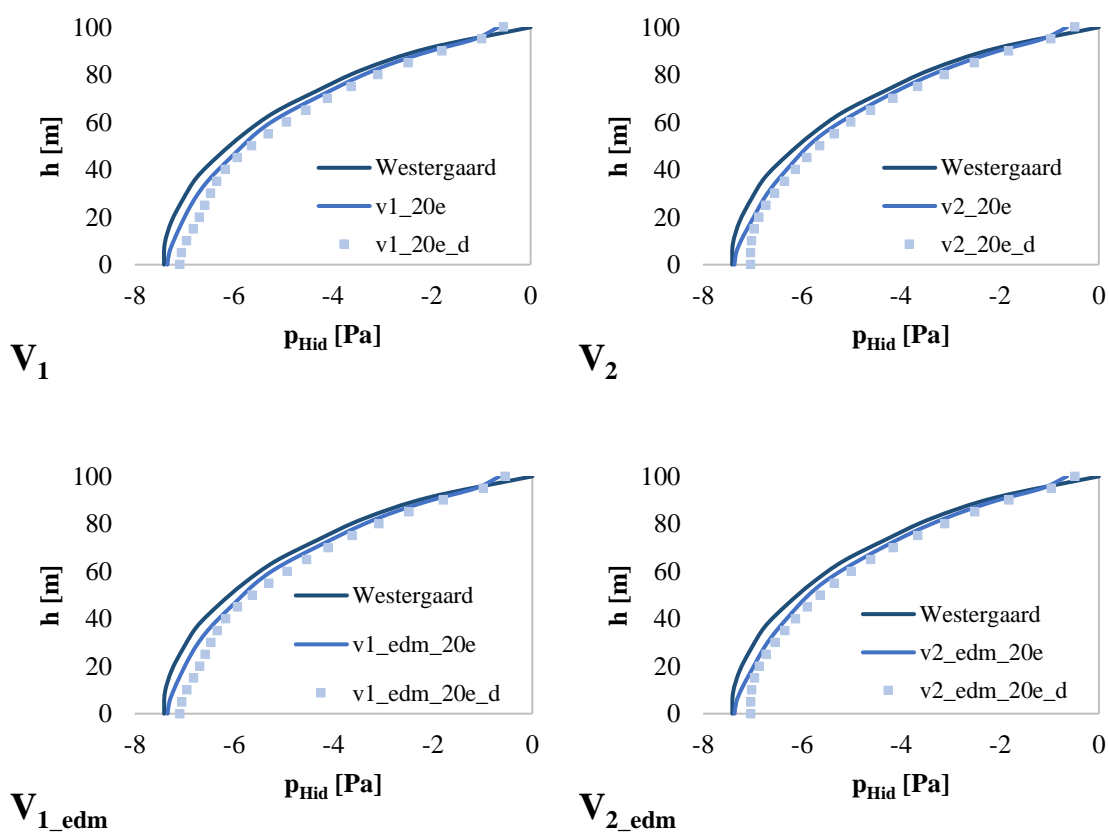


Figura 4.11 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para as malhas regulares de elementos cúbicos e de elementos distorcidos

Da análise da Figura 4.11, observa-se que a malha com elementos do tipo cúbico conduz a resultados numéricos mais próximos dos propostos por Westergaard, para os vários tipos de elemento e para os vários coeficientes de penalização adotados. Os valores obtidos indicam que a geometria dos elementos representativos do fluido pode ter relevância no seu desempenho.

4.2.8 Quinto estudo – Discretização da malha junto ao paramento vertical da barragem

Neste último estudo, foi feita uma discretização mais refinada da malha de elementos finitos na proximidade do paramento vertical (40 metros adjacentes), mantendo 20 elementos cúbicos em altura. A zona restante da albufeira foi discretizada com elementos cujo comprimento é o dobro da altura (Figura 4.12). Na Figura 4.13, os resultados numéricos obtidos para a malha com 20 elementos cúbicos em altura foram comparados com os valores obtidos com esta nova malha.

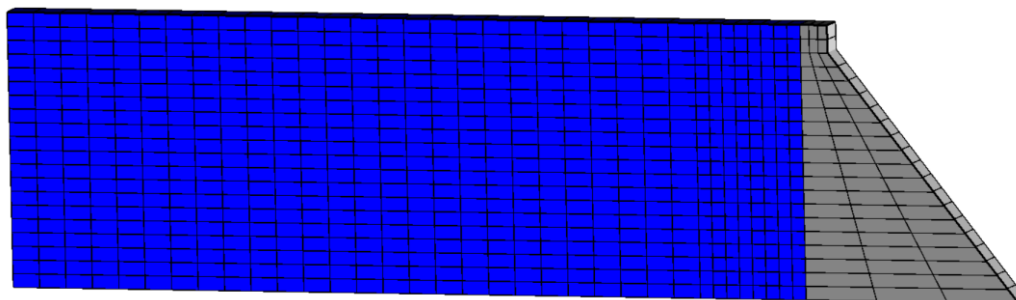


Figura 4.12 - Malha regular com elementos cúbicos junto ao paramento vertical

Da análise da Figura 4.13, verifica-se que com uma malha mais refinada somente nos primeiros 40m de albufeira (aproximadamente metade da altura da barragem) obtêm-se resultados numéricos muito próximos dos obtidos com uma malha refinada em toda a albufeira. Estes resultados mostram que a partir de uma determinada distância é possível reduzir o refinamento do modelo e continuar a obter resultados numéricos satisfatórios, diminuindo assim o esforço computacional.

Na Figura 4.14 apresenta-se a distribuição de pressões no paramento de montante da barragem obtida com os diferentes modelos e a sua comparação com a solução de Westergaard. De acordo com esta figura, a resposta numérica obtida com elementos de fluido que incluem o termo penalizador, (V_1) e (V_{1_edm}), não é tão próxima da solução de Westergaard quando comparada com a resposta obtida nos modelos com elemento de fluido sem termo penalizador, (V_2) e (V_{2_edm}). Os resultados obtidos indicam ainda que o valor do coeficiente de penalização deve ser avaliado em função da modelação que se pretende realizar (soluções estáticas, análise modal ou análises dinâmicas).

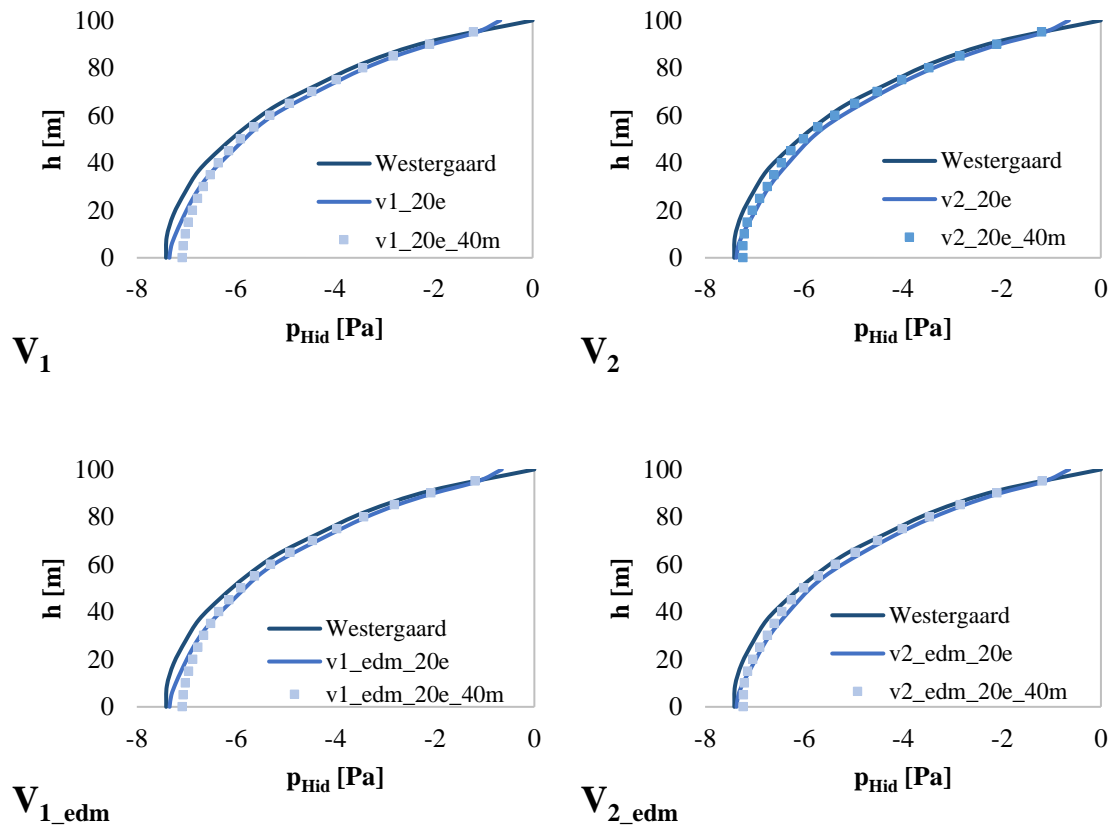


Figura 4.13 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e malhas regulares com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento vertical da barragem

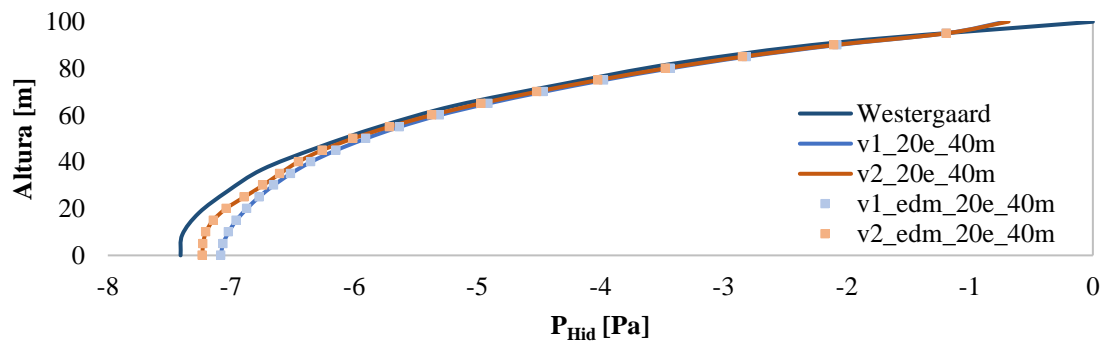


Figura 4.14 - Comparação das pressões hidrodinâmicas em elementos de uma malha regular com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento vertical da barragem

4.3 Barragem gravidade de paramento inclinado

4.3.1 Propriedades mecânicas

Nos estudos realizados adotaram-se as mesmas propriedades mecânicas que as adotadas no exemplo da barragem gravidade com paramento vertical, ver 4.2.1.

4.3.2 Geometria e condições de apoio

A Figura 4.15 representa a geometria do exemplo de uma barragem gravidade de paramento inclinado, com 100 m de altura, 60 m de comprimento na base e 10 m de largura no coroamento, tendo a albufeira 300 m de comprimento. No paramento inclinado da barragem é aplicada uma aceleração constante igual a -0.0001 m/s^2 na direção x , e na outra extremidade, de forma a verificar a condição de radiação, na mesma direção, considera-se (tal como no exercício anterior) a existência de amortecedores que garantem que as ondas não são refletidas na fronteira (Azevedo et al., 2008).

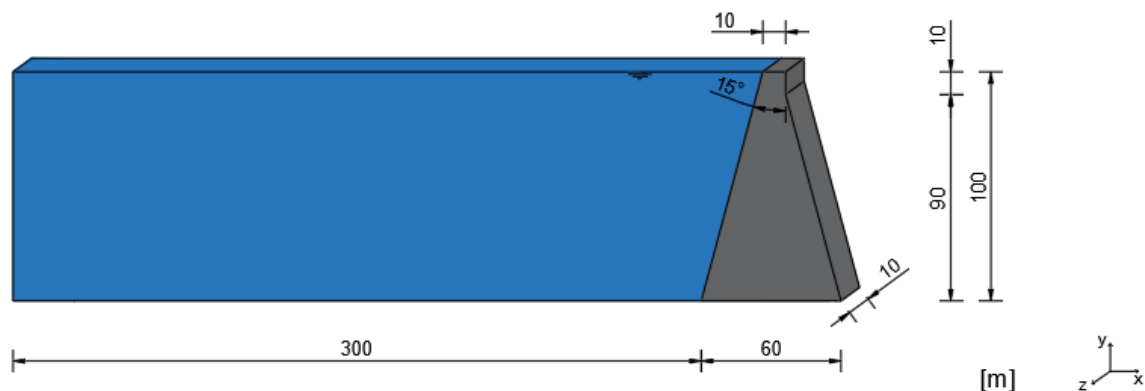


Figura 4.15 - Geometria do exemplo de barragem gravidade de paramento inclinado

4.3.3 Modelo numérico

Nos modelos numéricos utilizados no programa Parmac3D-Fflow para este exercício, foram analisados os seguintes elementos:

- (V_1) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- (V_2) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=0$;

- iii. (V_{1_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$, com elementos fictícios sobrepostos de 8 nós sem rigidez volumétrica e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- iv. (V_{2_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$.

Tal como referido anteriormente, adotou-se um esquema de solução no tempo baseado no método das diferenças centrais. Neste exemplo, procurou-se confirmar as conclusões extraídas do exemplo anterior e verificar se os modelos de fluido adotados apresentam bons resultados, comparando os resultados numéricos obtidos com as soluções propostas por Zangar para uma barragem gravidade de paramento inclinado.

Num primeiro estudo, foi verificada a validade de todos os elementos analisando as histórias de pressões hidrodinâmicas medidas em vários nós ao longo do paramento. Num segundo estudo, avaliou-se a importância da regularidade da malha para 10 elementos em altura, tal como no exercício anterior. Num terceiro estudo, compararam-se os resultados obtidos no estudo anterior com os obtidos para uma malha com 20 elementos em altura ao longo do paramento. Num quarto estudo, verificou-se a importância da geometria dos elementos. Por fim, num quinto estudo foi feita a comparação entre os resultados obtidos para 20 elementos cúbicos em altura, com uma discretização de elementos cúbicos mais refinada apenas nos 40 metros adjacentes ao paramento da barragem.

4.3.4 Primeiro estudo – Validação dos elementos estudados

Neste estudo foram analisados os elementos (V_1), (V_2), (V_{1_edm}), (V_{2_edm}), de forma a confirmar, se, para esta simulação, os elementos são válidos.

Foi adotada uma malha de uma fatia da barragem com 10 m de espessura (Figura 4.16). De forma a verificar a validade dos elementos, na Figura 4.17 são apresentadas as histórias das pressões hidrodinâmicas medidas em 10 nós ao longo do paramento inclinado da barragem.

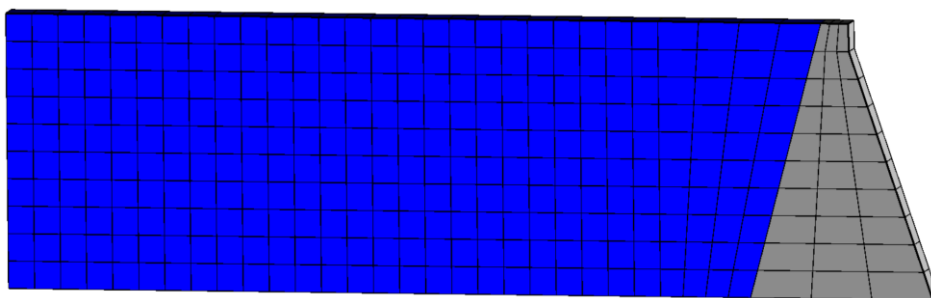


Figura 4.16 - Malha adotada para uma fatia de barragem gravidade de paramento inclinado – 15°

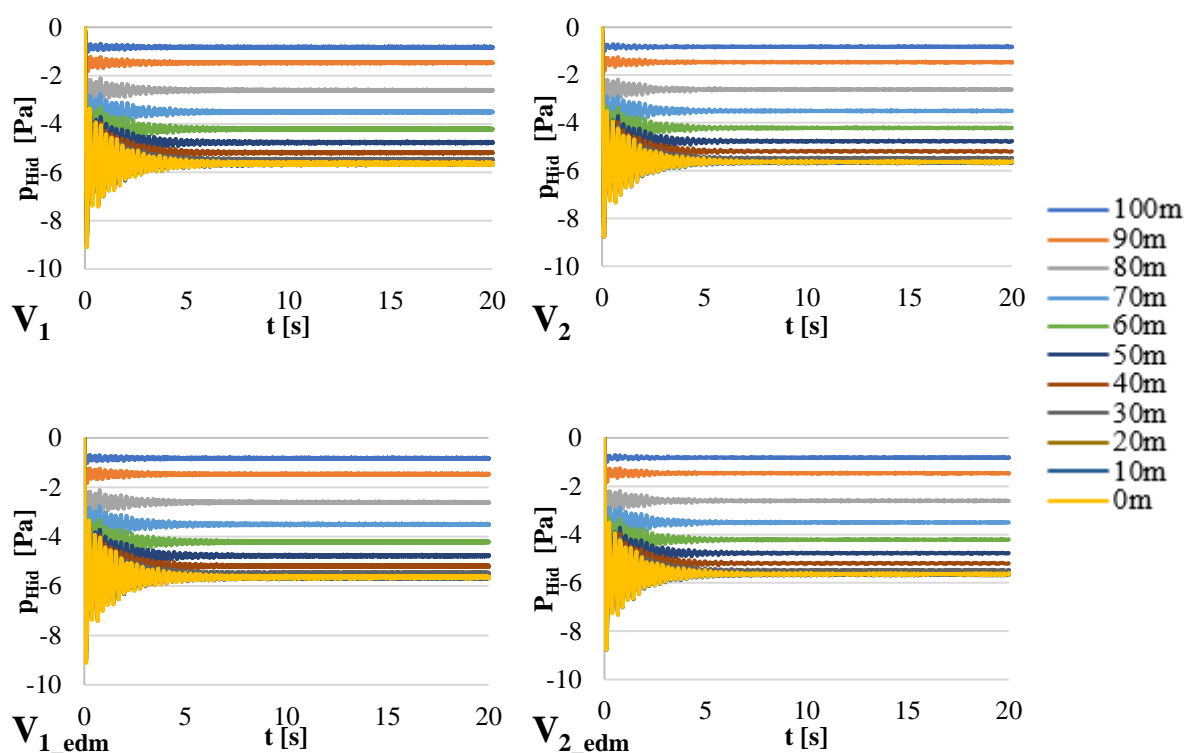


Figura 4.17 - História de pressões hidrodinâmicas numa barragem gravidade de paramento inclinado a 15°

Da análise da Figura 4.17, verifica-se que, tal como no exemplo anterior, todos os elementos de fluido e hipóteses de coeficiente de penalização conduzem a uma distribuição de pressões estável no paramento de montante da barragem.

4.3.5 Segundo estudo – Regularidade da malha

Como no exemplo da barragem gravidade de paramento vertical, foi feita a verificação da importância da regularidade da malha adotada. Foi então definida uma malha irregular (Figura 4.18) com 10 elementos em altura junto ao paramento inclinado da barragem.

A Figura 4.19 apresenta a comparação das distribuições de pressões para a malha do estudo anterior e para esta nova malha, assim como com a solução obtida experimentalmente por Zangar e a solução empírica proposta igualmente por Zangar (Zangar, 1952).

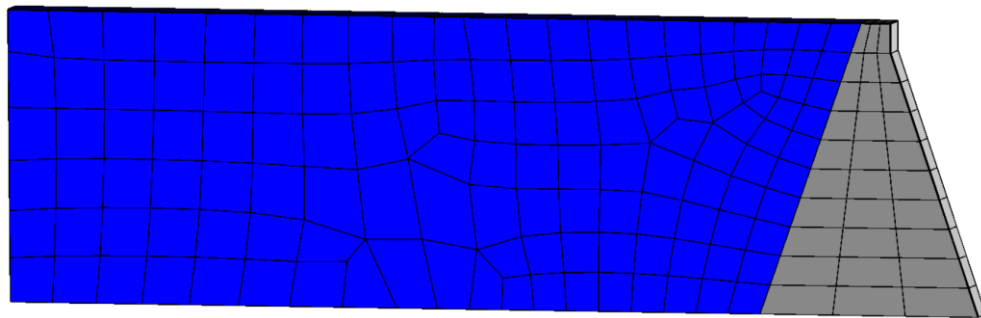


Figura 4.18 - Malha irregular adotada para uma barragem gravidade de paramento inclinado a 15°

Analisando a Figura 4.19, observa-se que os resultados obtidos são próximos das soluções propostas por Zangar. Observa-se também que na base do paramento (cota 0 m), as pressões hidrodinâmicas obtidas com a malha regular, para todos os elementos e hipóteses de valor de termo de penalização, são mais próximas da solução de Zangar que as pressões hidrodinâmicas obtidas com a malha irregular.

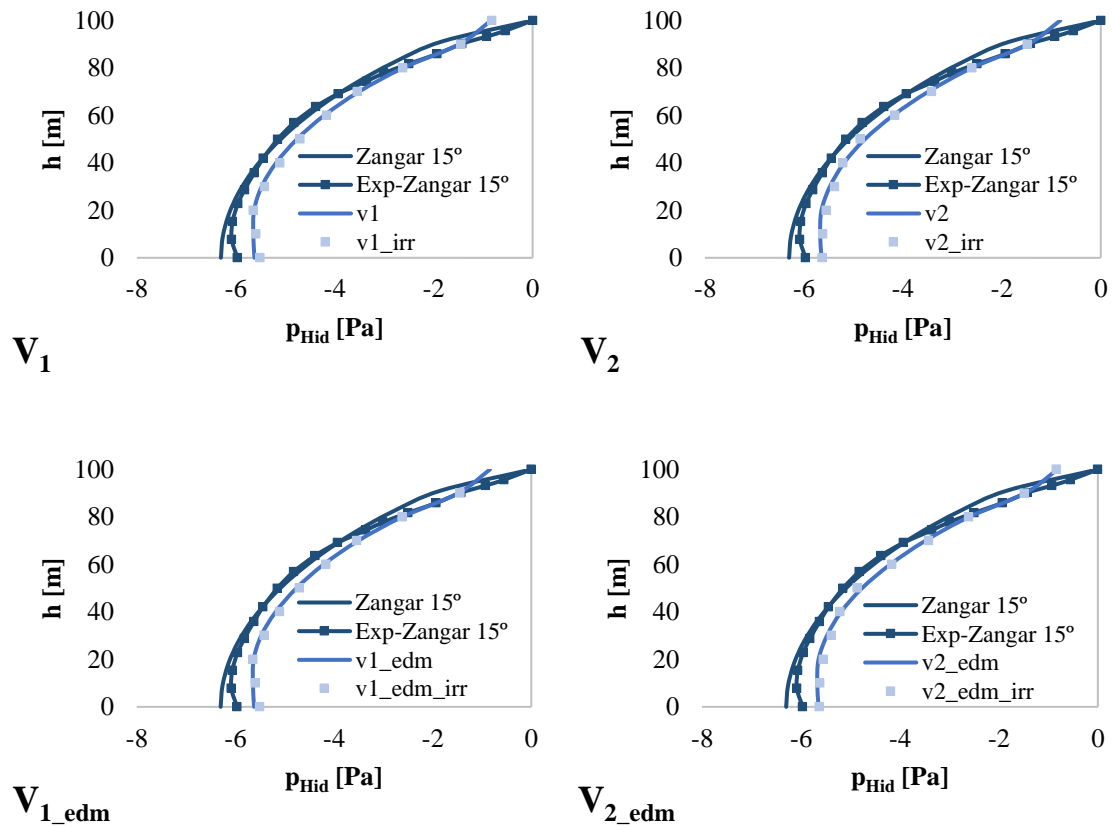


Figura 4.19 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para uma malha regular e uma malha irregular, para diferentes elementos numa barragem gravidade de paramento inclinado

4.3.6 Terceiro estudo – Aumento do número de elementos em altura, mantendo a geometria dos elementos

Neste estudo foi adotado um refinamento em altura do número de elementos, passando estes de 10 para 20 junto ao paramento inclinado da barragem e mantendo a geometria cúbica dos mesmos.

As malhas regular e irregular, com 10 e 20 elementos em altura junto ao paramento inclinado da barragem, apresentam-se nas Figuras 4.20 e 4.21, respectivamente. A comparação de pressões hidrodinâmicas obtidas com estas malhas é apresentada na Figura 4.22.

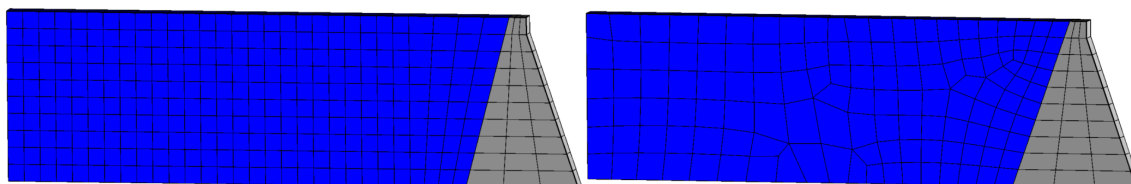


Figura 4.20 - Malhas regular e irregular com 10 elementos em altura junto ao paramento inclinado da barragem a 15°

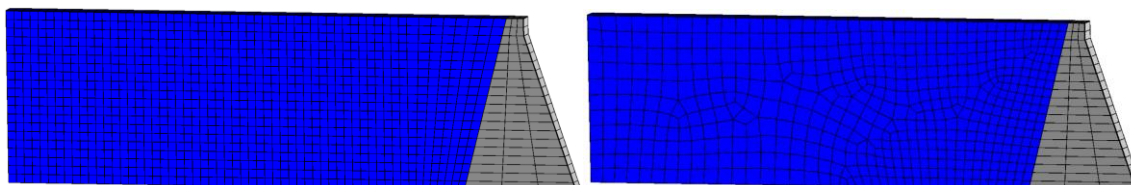


Figura 4.21 - Malhas regular e irregular com 20 elementos em altura junto ao paramento vertical da barragem a 15°

Da análise da Figura 4.22, verifica-se que com uma maior discretização da malha as pressões hidrodinâmicas obtidas através dos modelos se aproximam da solução experimental de Zangar. Observando as pressões na base da barragem (cota 0 m), verifica-se que para todos os elementos as malhas regulares apresentam resultados mais próximos da solução proposta por Zangar em comparação com as malhas irregulares.

Tal como no estudo da barragem de paramento vertical, comprova-se assim a importância da regularidade da malha para a obtenção de melhores resultados.

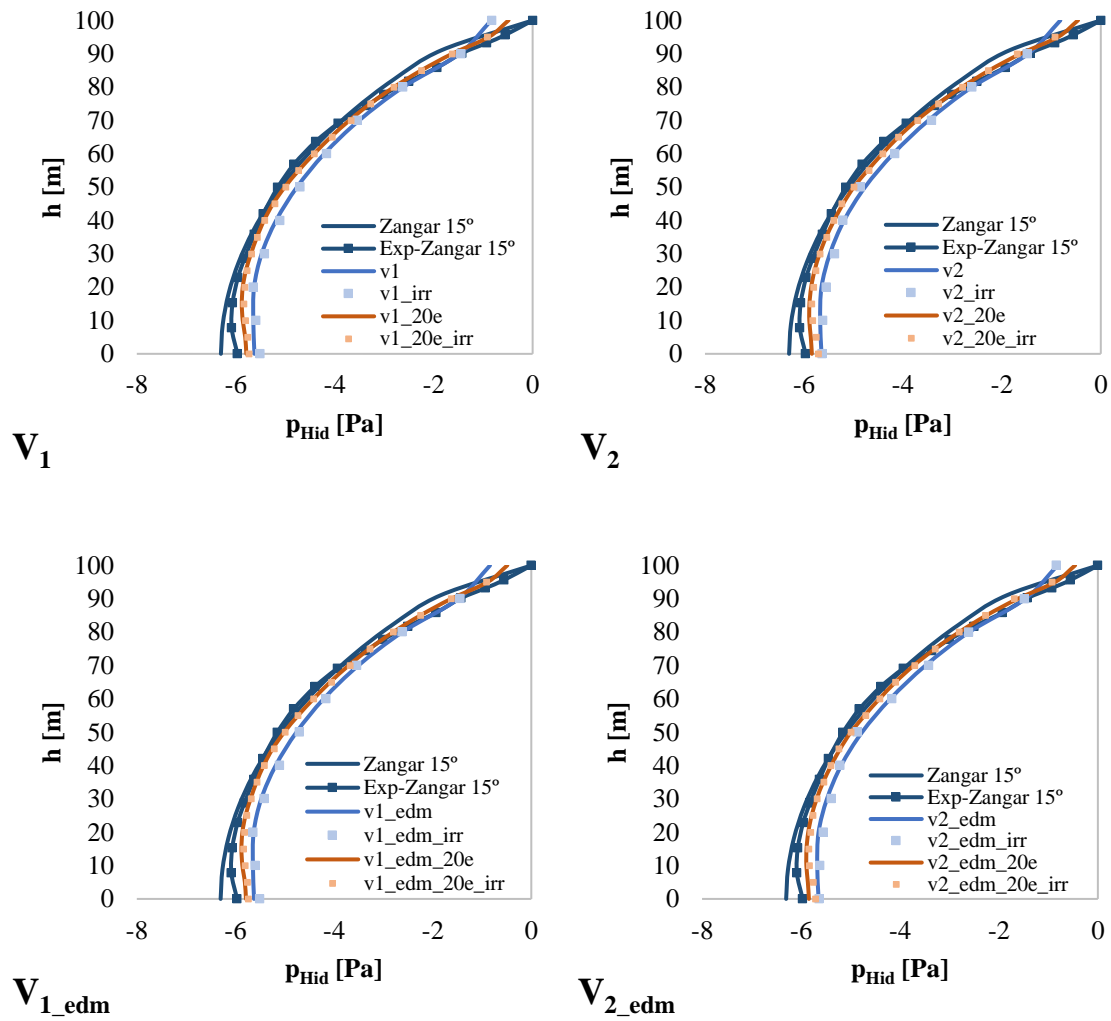


Figura 4.22 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares e irregulares com 10 e 20 elementos em altura junto ao paramento inclinado da barragem

4.3.7 Quarto estudo – Geometria dos elementos

Neste estudo considerou-se uma nova malha com 20 elementos em altura, correspondendo o comprimento de cada elemento ao dobro da sua altura (Figura 4.23).

Foram comparadas as distribuições de pressão obtidas no paramento de montante com a malha regular da Figura 4.21 e com esta nova malha. Esta comparação é apresentada na Figura 4.24.

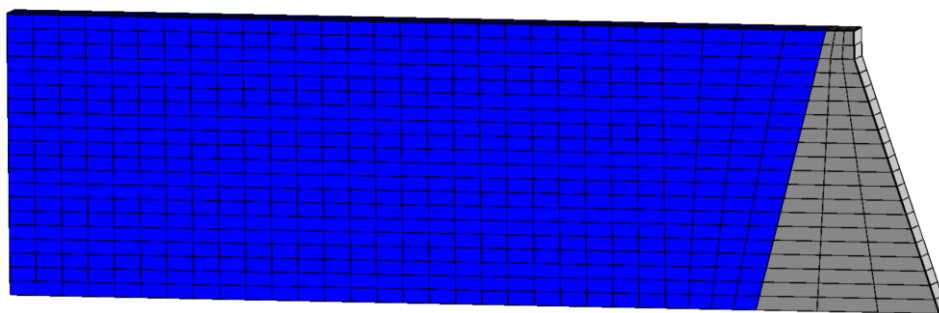


Figura 4.23 - Malha regular com 20 elementos em altura (comprimento de cada elemento igual ao dobro da altura – 15°)

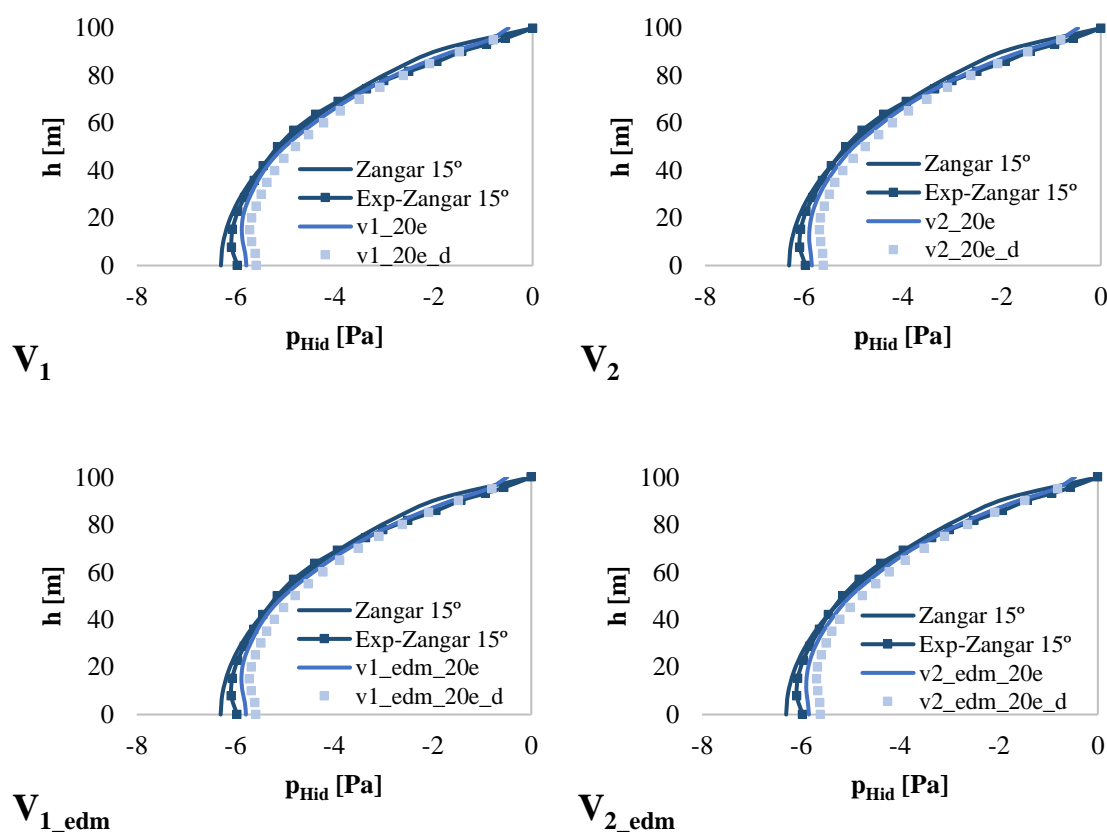


Figura 4.24 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e de elementos distorcidos

Tal como no estudo da barragem de paramento vertical, observa-se que as malhas de elementos cúbicos são as que apresentam melhores resultados, confirmando a importância da geometria cúbica no desempenho dos elementos de fluido em deslocamentos.

4.3.8 Quinto estudo – Discretização da malha junto ao paramento inclinado da barragem

Neste último estudo, foi efetuada uma discretização da malha regular nos 40 metros adjacentes ao paramento inclinado da barragem, mantendo 20 elementos cúbicos em altura e os restantes elementos com comprimento igual ao dobro da altura (Figura 4.25). Na Figura 4.26 apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos com a malha com 20 elementos cúbicos em altura e com esta nova malha.

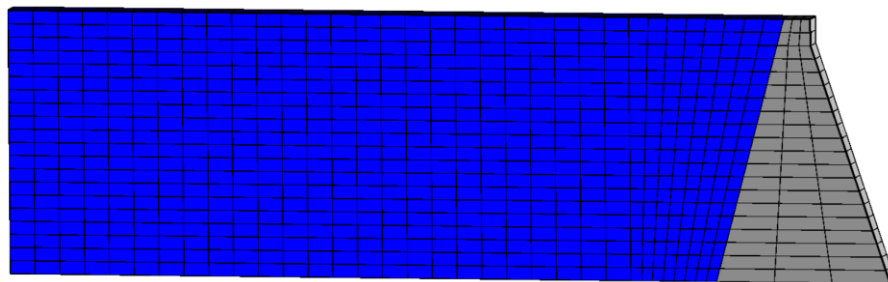


Figura 4.25 - Malha regular com elementos cúbicos junto ao paramento inclinado a 15°

Observando a Figura 4.26, conclui-se que, tal como no exercício anterior da barragem gravidade de paramento vertical, a discretização mais refinada nos 40 metros de albufeira mais próximos do paramento de montante conduz a resultados bastante próximos dos obtidos com uma malha com todos os elementos cúbicos. Verifica-se assim que, desde que a malha de elementos de fluido seja suficientemente refinada na proximidade do paramento de montante da barragem, é possível adotar malhas menos refinadas na discretização da restante zona da albufeira, de modo a reduzir o esforço computacional dos modelos numéricos representativos do conjunto barragem-albufeira-fundação.

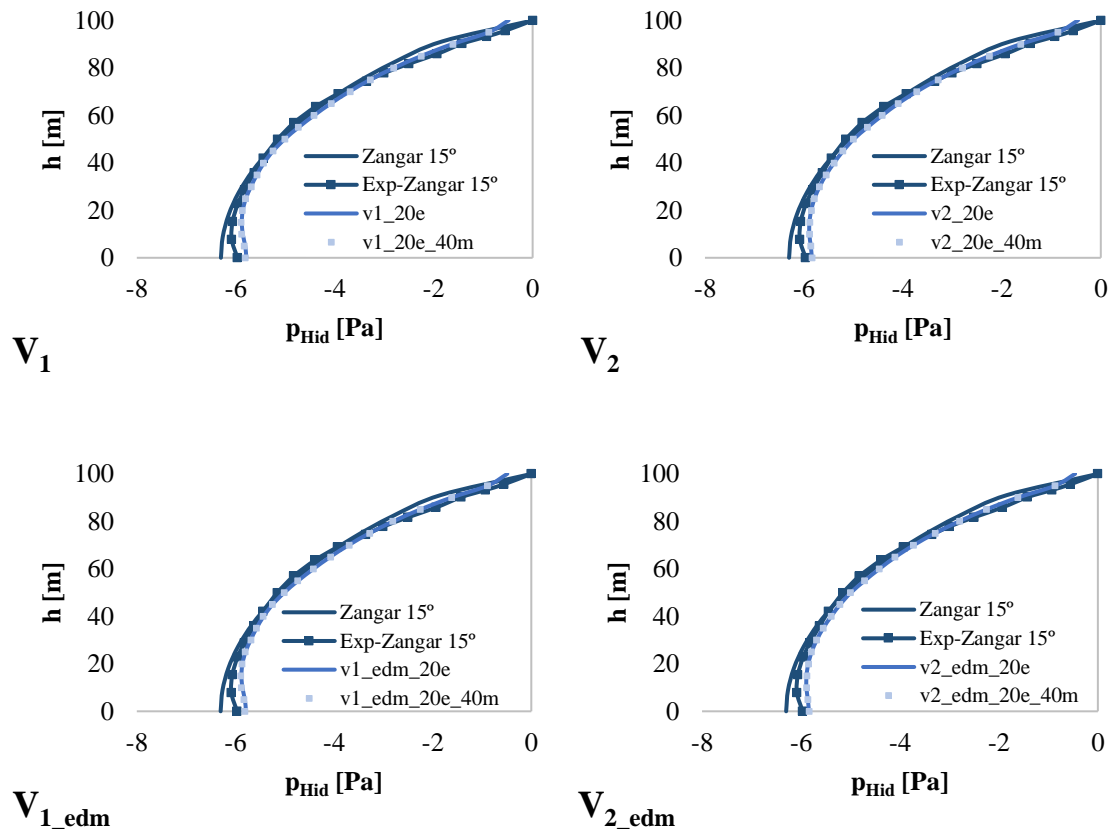


Figura 4.26 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e malhas regulares com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento inclinado da barragem

Na Figura 4.27 apresenta-se a comparação das distribuições de pressões entre elementos, observando-se que os elementos V_2 e V_{2_edm} , com coeficiente penalizador nulo, são, tal como no exemplo da barragem de paramento vertical, os que apresentam resultados numéricos mais próximos dos observados experimentalmente por Zangar.

Para além destes estudos, onde se considerou uma inclinação de 15° , foram também feitos estudos para inclinações de 20° e 30° . Optou-se por apresentar apenas os resultados relativos à inclinação de 15° , pois resultado experimental de Zangar corresponde a esta inclinação. Em todo o caso, para uma inclinação de 20° obtiveram-se resultados numéricos equivalentes aos obtidos para uma inclinação de 15° .

Para uma inclinação de 30° , os elementos com coeficiente de penalização (V_1 e V_{1_edm}), apresentaram resultados numéricos que não se aproximam da solução de Zangar, não sendo

possível obter uma distribuição de pressões estável. Concluiu-se assim que o coeficiente de penalização não é aconselhável para elementos que apresentem uma distorção significativa e que, para este tipo de malhas, é importante proceder ao seu refinamento na proximidade do paramento (Figura 4.28). Os resultados obtidos para os elementos V_2 e V_{2_edm} são apresentados na Figura 4.29, sendo possível observar que as distribuições de pressões se aproximam das obtidas experimentalmente por Zangar.

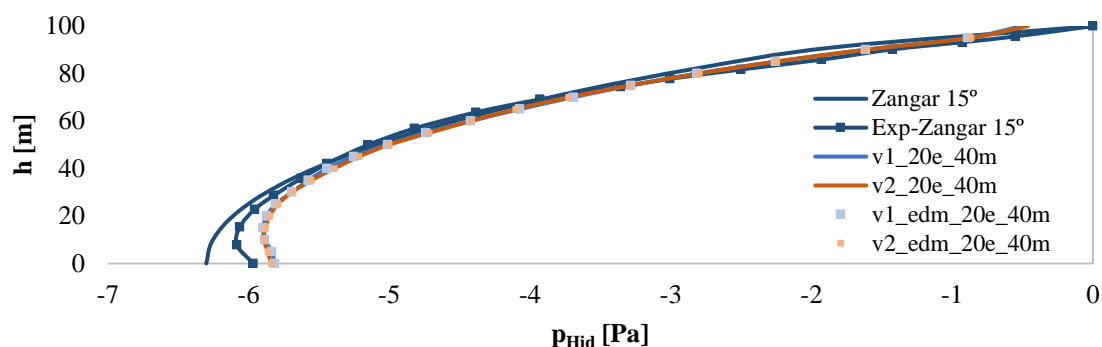


Figura 4.27 - Comparação das pressões hidrodinâmicas para malhas regulares de elementos cúbicos e para malhas regulares com elementos cúbicos apenas nos 40 m adjacentes ao paramento inclinado da barragem

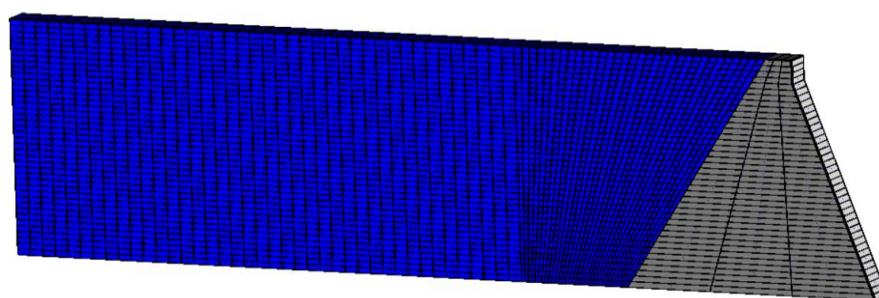


Figura 4.28 - Malha regular com elementos cúbicos junto ao paramento inclinado a 30°

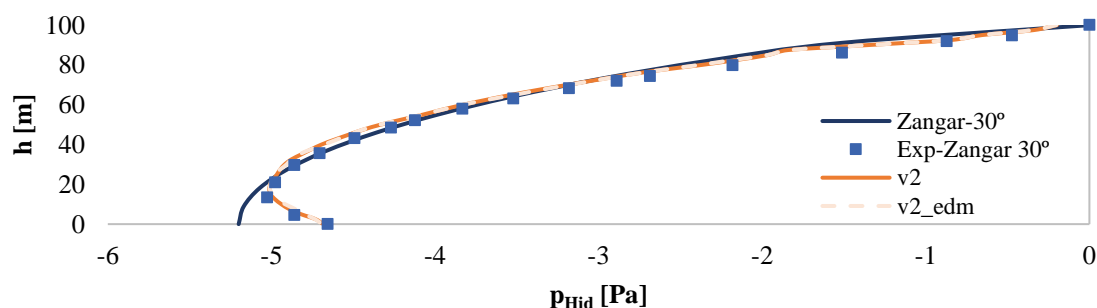


Figura 4.29 – Comparação entre as distribuições de pressões hidrodinâmicas obtidas numericamente para os elementos V_2 e V_{2_edm} e as soluções de Zangar

4.4 Barragem abóbada - Barragem do Alto Lindoso

Foi realizada uma modelação numérica onde se considerou uma aceleração constante aplicada no paramento de montante de uma barragem abóbada com a geometria aproximada da barragem do Alto Lindoso. Nessa modelação, foram analisadas duas malhas diferentes para os elementos de fluido e da barragem, adaptando a malha da fundação à discretização adotada no fluido e na barragem. A Figura 4.30 apresenta os modelos da malha *e* da barragem, formada por 382 elementos hexaédricos correspondentes a um total de 5216 pontos nodais, e da malha *f* da barragem, formada por 764 elementos hexaédricos correspondentes a um total de 10329 pontos nodais. Os elementos hexaédricos adotados têm 20 nós e 27 pontos de Gauss.

São também apresentados os alinhamentos A, B e C, onde foram registados os valores de pressão hidrodinâmica obtidos neste estudo.

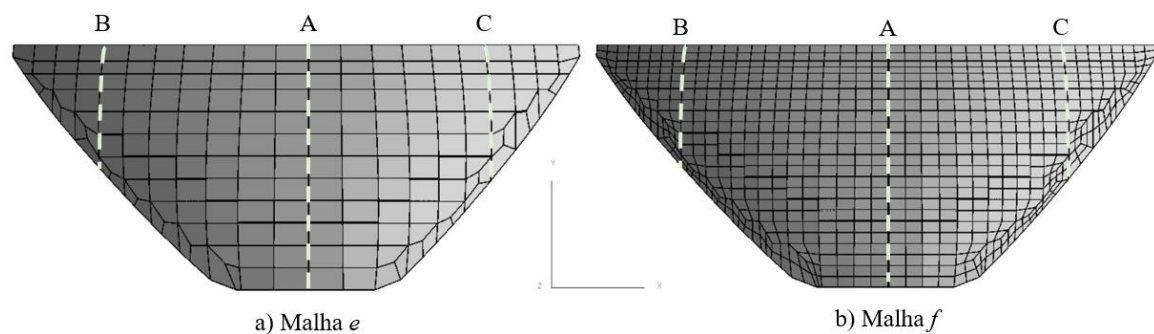


Figura 4.30 - Malhas adotadas para a barragem do Alto Lindoso

4.4.1 Propriedades mecânicas

Na tabela 4.3 são apresentadas as propriedades mecânicas do fluido e na tabela 4.4 as propriedades mecânicas dos elementos de interface fluido/sólido adotadas nos modelos numéricos propostos.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do fluido

	Fluido
Módulo de compressibilidade K_v [GPa]	2,00
Massa volúmica ρ [ton/m ³]	1,00

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas dos elementos de interface

	Interfaces	
	Barragem/ Fluido	Fundação/ Fluido
k_n [GPa/m]	2,00	2,00
k_s [GPa/m]	0	0

4.4.2 Geometria e condições de apoio

No paramento de montante da barragem foi aplicada uma aceleração constante igual a 0.0001 m/s² na direção global z (eixo do vale). Na base do modelo e nas fronteiras laterais da fundação, os deslocamentos na direção normal foram restringidos. Na fronteira lateral livre da albufeira, foi adotada uma condição de radiação na direção normal, ver 4.2.2.

As Figuras 4.31 e 4.32 representam, respetivamente, as malhas *e* e *f* adotadas para a fundação, barragem e reservatório. Nas duas malhas, o comprimento do reservatório é considerado igual a 3 vezes a altura da barragem. Com estas duas diferentes discretizações, procurou-se aprofundar as indicações extraídas dos exercícios anteriores, nomeadamente as relativas à importância da regularidade e do refinamento da malha na proximidade do paramento de montante, tendo em vista um melhor desempenho do modelo de fluido.

- Na malha *e*, com menor discretização, o reservatório é composto por 6685 elementos hexaédricos que correspondem a um total de 13190 pontos nodais.

- ii. Na malha f , com maior discretização, o reservatório é composto por 26740 elementos hexaédricos que correspondem a um total de 43218 pontos nodais.

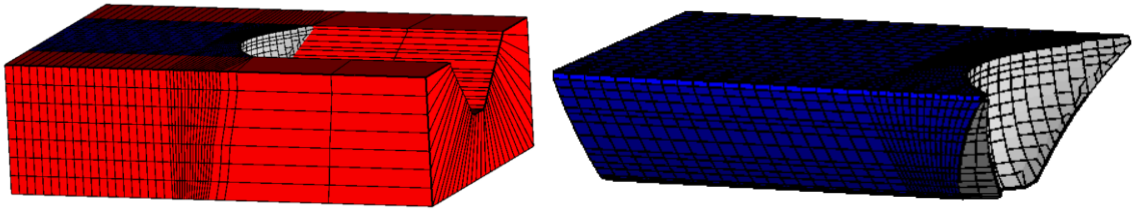


Figura 4.31 - Malha e do conjunto fundação-barragem-reservatório

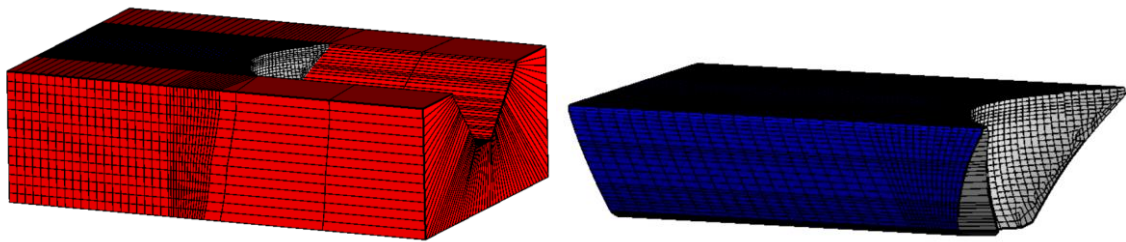


Figura 4.32 - Malha f do conjunto fundação-barragem-reservatório

4.4.3 Modelo numérico

Nos modelos numéricos utilizados no programa Parmac3D-Fflow para este exercício, foram analisados os seguintes elementos:

- i. (V_1) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- ii. (V_2) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=0$;
- iii. (V_{1_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$, com elementos fictícios sobrepostos de 8 nós sem rigidez volumétrica e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- iv. (V_{2_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$.

Foi adotado um esquema de solução no tempo baseado no método das diferenças centrais.

Neste exemplo, procurou-se confirmar as conclusões dos exemplos anteriores, verificar se os modelos de fluido adotados conduzem a resultados expectáveis, nomeadamente em termos de

estabilização de pressões, e observar a validade da solução teórica de Westergaard, desenvolvida para paramentos verticais, para uma barragem com geometria do tipo abóbada.

4.4.4 Primeiro estudo – Validação dos elementos estudados

Neste estudo, foram analisados os elementos (V_1) , (V_2) , (V_{1_edm}) , (V_{2_edm}) , de forma a confirmar, se, para este caso, os elementos são válidos.

Nas Figuras 4.33 e 4.34 são apresentadas as histórias das pressões hidrodinâmicas para o elemento V_2 , medidas nos nós pertencentes aos alinhamentos A, B e C das malhas e e f , respetivamente. Os elementos (V_1) , (V_{1_edm}) e (V_{2_edm}) não apresentaram convergência para uma solução de pressões constante no tempo com nenhuma das malhas, pelo que daqui em diante apenas será considerado o elemento V_2 .

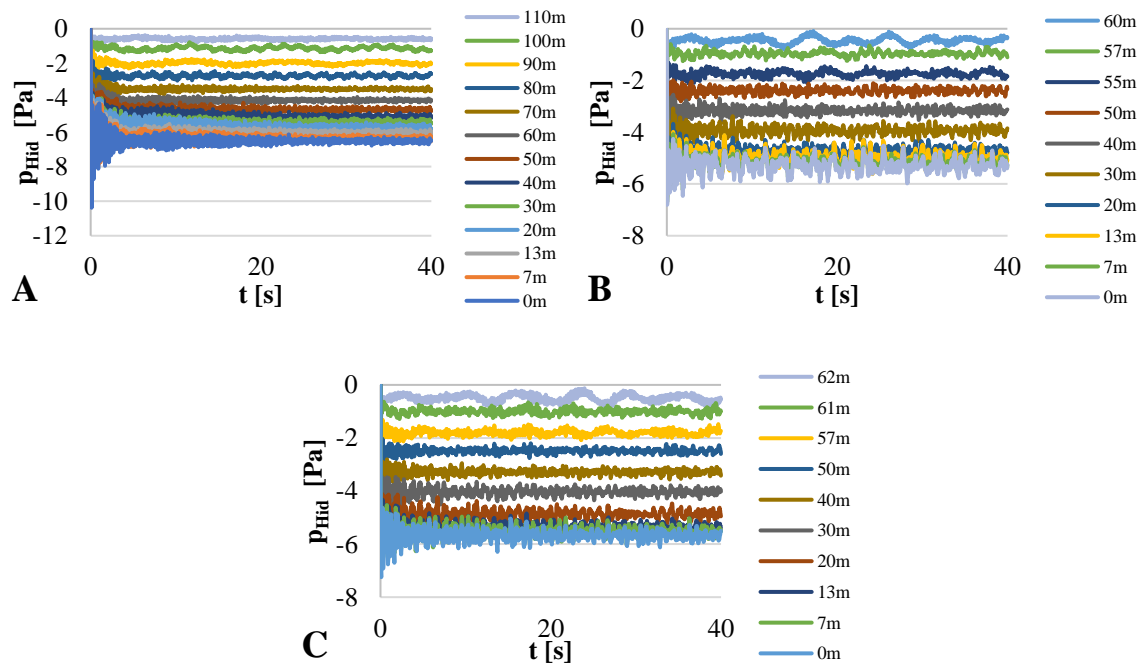


Figura 4.33 - História de pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C do modelo da barragem do Alto Lindoso – malha e , elemento V_2

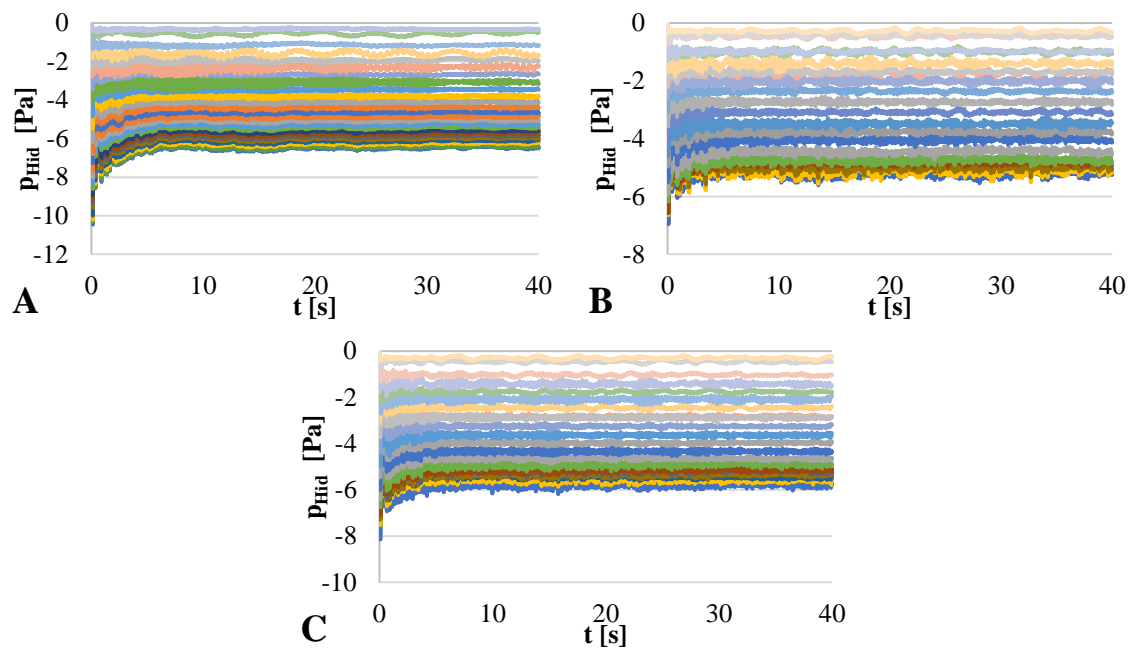


Figura 4.34 - História de pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C do modelo da barragem do Alto Lindoso – malha f , elemento V_2

Analisando as Figuras 4.33 e 4.34, verifica-se que o elemento de fluido V_2 conduz a uma distribuição de pressões estável no paramento de montante da barragem, tanto para a malha e como para a malha f . No entanto, observa-se que a malha f apresenta melhor estabilidade da solução. Tal deve-se ao maior refinamento desta malha junto ao paramento.

4.4.5 Segundo estudo – Comparação das pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C entre as malhas e e f

Na Figura 4.35 apresentam-se as pressões hidrodinâmicas obtidas nos alinhamentos A, B e C para o elemento V_2 , para as malhas e e f . Observa-se que os resultados numéricos obtidos com a malha menos refinada (e) se aproximam dos resultados obtidos com a malha mais refinada (f).

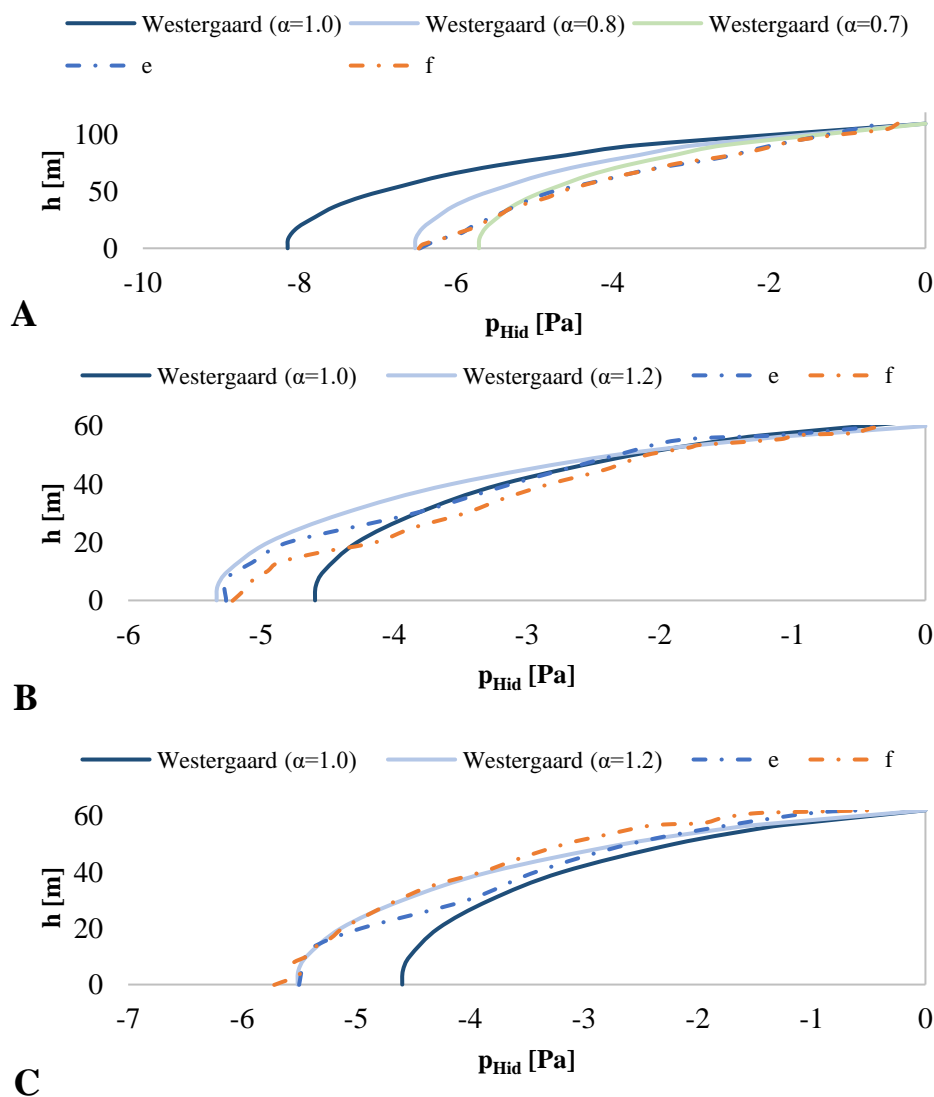


Figura 4.35 - Pressões hidrodinâmicas nos alinhamentos A, B e C para as malhas e e f – elemento V_2

Da análise da Figura 4.35, constata-se que é necessário introduzir um fator multiplicativo (α) na solução de Westergaard de forma a obter uma solução semelhante às obtidas com base nos modelos numéricos desenvolvidos. A introdução deste fator multiplicativo resulta da solução de massas associadas de Westergaard ser destinada a barragens rígidas de paramento vertical e não a barragens abóbada, como é o caso da barragem do Alto Lindoso. Observa-se igualmente que o fator multiplicativo depende do bloco a avaliar, sendo requerido um valor multiplicativo inferior a 1 na proximidade do bloco central ($\approx 0,7$ a $0,8$) e um valor ligeiramente superior a 1 em blocos próximos dos encontros ($\approx 1,2$).

5 MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO EM VIBRAÇÃO FORÇADA DA BARRAGEM GRAVIDADE PINE FLAT E DA BARRAGEM ABÓBADA DO ALTO LINDOSO

5.1 Considerações iniciais

A caracterização do estado de conservação de barragens em serviço é usualmente realizada através de ensaios dinâmicos em vibração forçada (Câmara et al., 1995) e sistemas de monitorização em contínuo (Oliveira & Alegre, 2019). Nos ensaios de vibração forçada aplica-se uma força sinusoidal, com componentes horizontal e vertical, para uma dada gama de frequências. Para cada frequência, regista-se em vários pontos a evolução dos deslocamentos, velocidades ou acelerações. Estes registos são posteriormente analisados de modo a se encontrar as amplitudes máximas em função da frequência da força sinusoidal associada. Deste modo é possível caracterizar de forma indireta os modos de vibração, através da análise dos picos da função de transferência (Lemos & Gomes, 2007). O conhecimento das frequências naturais da estrutura permite estimar o módulo de elasticidade do betão da barragem, o qual, comparado com o valor obtido em ensaios de campo e laboratoriais na fase de construção, permite estimar se o comportamento da barragem pode ser considerado como elástico linear ou se por algum motivo se identifica a ocorrência de fendilhação (Gomes et al., 2016).

Em ensaios de vibração forçada, com exceção da hipótese de albufera vazia, é necessário ter em consideração a interação fluido-estrutura. Neste capítulo pretende-se analisar o comportamento dos elementos de fluido e das hipóteses de termos de penalização adotados (ver ponto 3.3.1.3), sob vibração forçada.

São analisadas duas barragens: a barragem Pine Flat, uma barragem gravidade com 130 m de altura e 560 m de desenvolvimento, localizada nos Estados Unidos da América, e a barragem do Alto Lindoso, uma barragem abóbada com 110 m de altura, localizada em Portugal no distrito de Viana do Castelo.

Em ambas as barragens, são aplicadas forças sinusoidais dentro de uma dada gama de frequências. Tal como já referido, para cada valor de frequência, o deslocamento em função do

tempo é medido num determinado ponto. Este procedimento permite obter as frequências naturais da estrutura, a partir dos picos das curvas dos deslocamentos.

5.2 Barragem de Pine Flat

Na discretização do bloco principal da barragem Pine Flat adotaram-se dois elementos em espessura. Foram geradas duas malhas de elementos finitos, uma regular (Figura 5.1a) e outra irregular (Figura 5.1b). Tanto o modelo numérico da malha regular como o modelo numérico da malha irregular são representados por 1312 elementos hexaédricos de que correspondem a um total de 6367 pontos nodais. Os elementos hexaédricos adotados têm 8 nós e 8 pontos de Gauss. Nestas figuras é também representado o ponto A, onde foram medidos os deslocamentos neste estudo.

As funções de transferência, que permitem estimar as frequências naturais obtidas através dos modelos numéricos com discretização da albufera, são comparadas com as funções de transferência em que se admite no paramento de montante uma distribuição adicional de massas associadas com base na solução proposta por Westergaard.

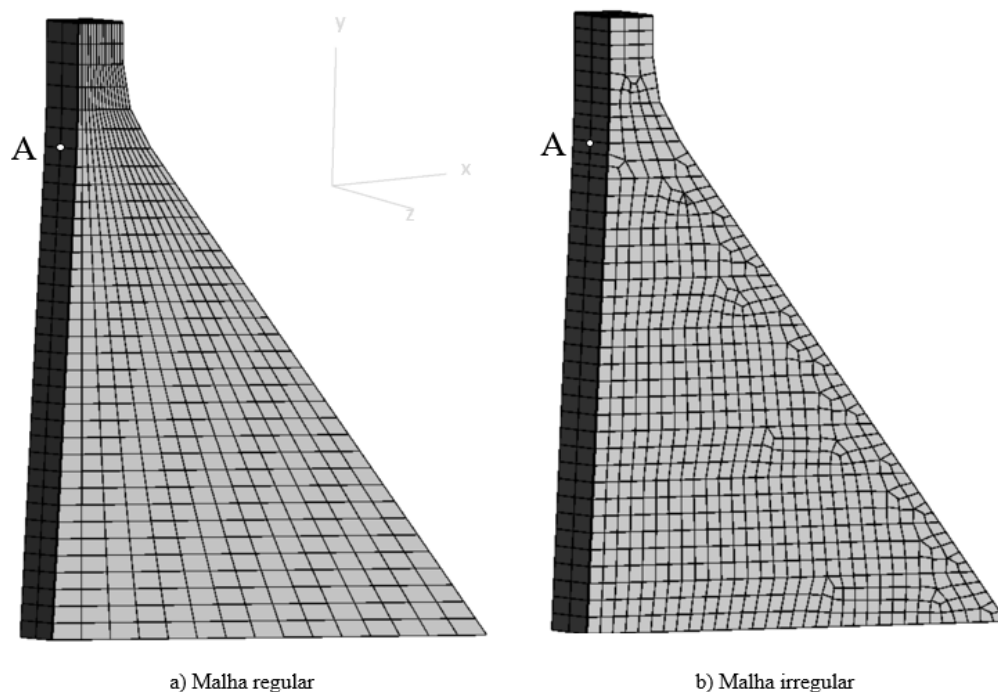


Figura 5.1 – Malhas adotadas para a barragem Pine Flat

5.2.1 Propriedades mecânicas

Na Tabela 5.1 são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais da barragem, da fundação e do fluido, propostas no âmbito do estudo numérico realizado anteriormente pela ICOLD (Valente et al., 2019). Na Tabela 5.2 são apresentadas as propriedades mecânicas dos elementos de interface adotados, tanto para a interação entre o fluido e o conjunto barragem - fundação como para a interação entre a os elementos da barragem e da fundação. Tal como indicado na Tabela 5.2, adotaram-se várias juntas horizontais de construção. Neste estudo admitiu-se amortecimento de Rayleigh ($\alpha = 0.75$ e $\beta = 0.0005$), idêntico ao proposto por Valente et al., (2019).

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos materiais

	Barragem	Fundação	Fluído
Coefficiente de Poisson ν	0,20	0,20	-
Módulo de Young E [GPa]	22,41	22,41	-
Massa volúmica ρ [ton/m³]	2,483	2,483	1,00
Módulo de compressibilidade K_v [GPa]	-	-	2,00

Tabela 5.2 -Propriedades mecânicas dos elementos de interface

	Interfaces				
	Barragem/ Barragem	Barragem/ Fundação	Fundação/ Fundação	Barragem/ Reservatório	Fundação/ Reservatório
k_n [GPa/m]	48,84	48,84	48,84	4,00	4,00
k_s [GPa/m]	19,54	19,54	19,54	0	0

5.2.2 Geometria e condições de apoio

Em ambos os modelos numéricos adotados (malha regular e malha irregular), foram aplicadas forças de vibração unitárias a meio do coroamento da face de montante da barragem, num intervalo de frequências de 1,5 a 6,0 Hz, em incrementos de 0,1 Hz.

Para cada força de vibração por frequência, foi executada uma simulação durante 20 segundos, tempo suficiente para se atingir a estabilidade da resposta na gama de frequências adotada. Na análise de vibração forçada não é necessário considerar as ações estáticas associadas ao fluido do reservatório nem ao peso próprio da barragem. Considera-se que os pontos nodais na base do modelo e nas partes laterais da fundação têm os seus graus de liberdade restringidos na direção normal. Na albufera adota-se uma condição de radiação na fronteira lateral livre ver 4.2.2.

As Figuras 5.2 e 5.3 representam, respetivamente, as malhas regular e irregular adotadas para a fundação, barragem e reservatório. Em ambas as malhas, o comprimento do reservatório é considerado igual a 3 vezes a altura da barragem. Tanto na malha regular como na malha irregular, o reservatório é discretizado em 3720 elementos hexaédricos, que correspondem a um total de 13660 pontos nodais para o caso em que são utilizados elementos cúbicos de 8 nós.

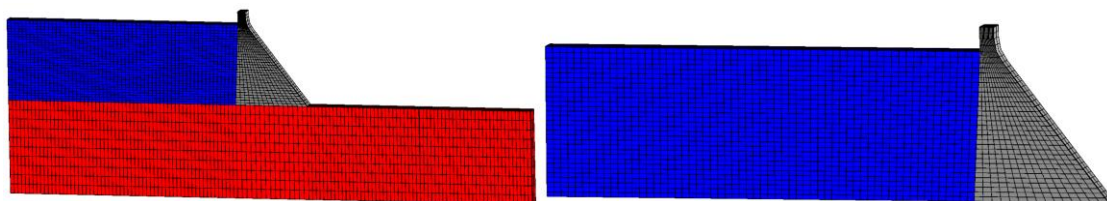


Figura 5.2 – Malha regular do conjunto fundação-barragem-reservatório

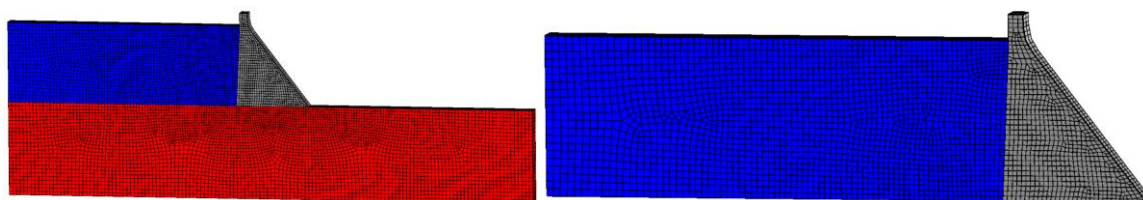


Figura 5.3 – Malha irregular do conjunto fundação-barragem-reservatório

5.2.3 Modelo numérico

Nos modelos numéricos utilizados no programa Parmac3D-Fflow para este exercício, foram considerados os seguintes elementos:

- i. (V_1) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- ii. (V_2) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=0$;
- iii. (V_{1_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$, com elementos fictícios sobrepostos de 8 nós sem rigidez volumétrica e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- iv. (V_{2_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$.

Adotou-se como método de solução no tempo o método de Newmark, atendendo a que se admitiu comportamento elástico linear dos materiais e que para essa hipótese os modelos de natureza implícita são computacionalmente muito mais rápidos que os modelos explícitos.

5.2.4 Frequências próprias

Nas Figuras 5.4 e 5.5 são representadas as curvas de deslocamentos máximos obtidos numericamente no ponto A, em x (eixo do vale) e y (direção vertical), tanto para a malha regular como para a malha irregular, assim como os resultados obtidos com um modelo de massas de Westergaard, para um intervalo de frequências de 1,5 a 6,0 Hz,

Da análise das Figuras 5.4 e 5.5, em que se apresentam as funções de transferência obtidas numericamente, é possível observar que os modelos numéricos de discretização da albufera preveem 4 picos, correspondentes às primeiras 4 frequências naturais da estrutura, tanto na direção x como na direção y, enquanto a solução numérica com base nas massas associadas de Westergaard prevê apenas 3 picos em ambas as direções

Os resultados obtidos mostram que, em barragens gravidade em que usualmente se discretiza somente uma fatia tridimensional, a irregularidade da malha não tem influência significativa nos resultados. Verifica-se ainda que o termo de penalização em malhas regulares deste tipo não é relevante, tendo-se obtido praticamente os mesmos resultados com e sem penalização. Verifica-se também que, em malhas com elementos finitos do tipo cúbico de 8 nós, o elemento finito de 8 nós

sub-integrado e o elemento hexaédrico de 8 nós de discretização mista (8N-EDM) apresentam comportamento muito similar.

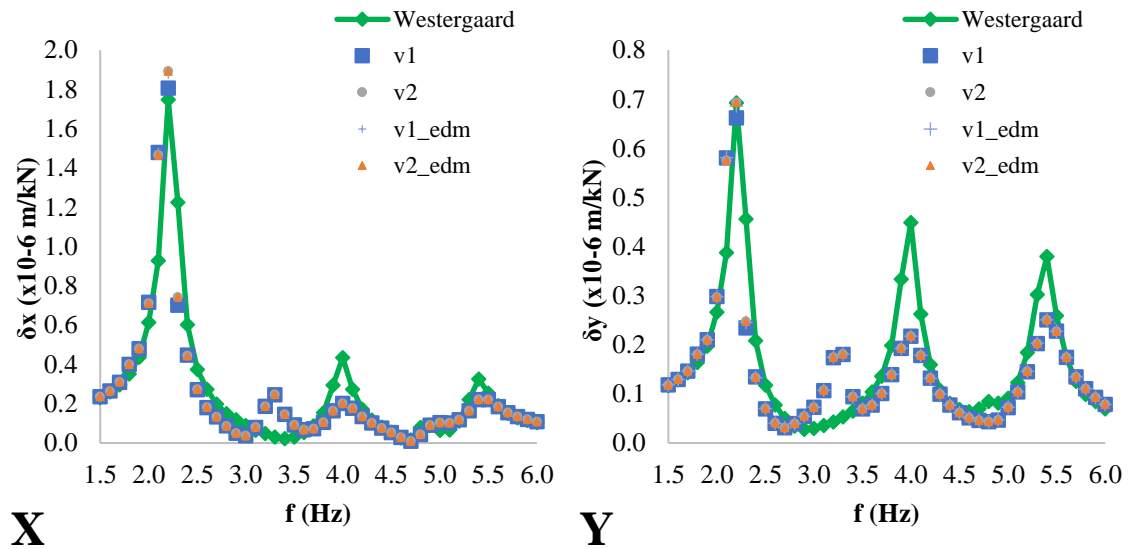


Figura 5.4 – Deslocamentos no ponto A, malha regular

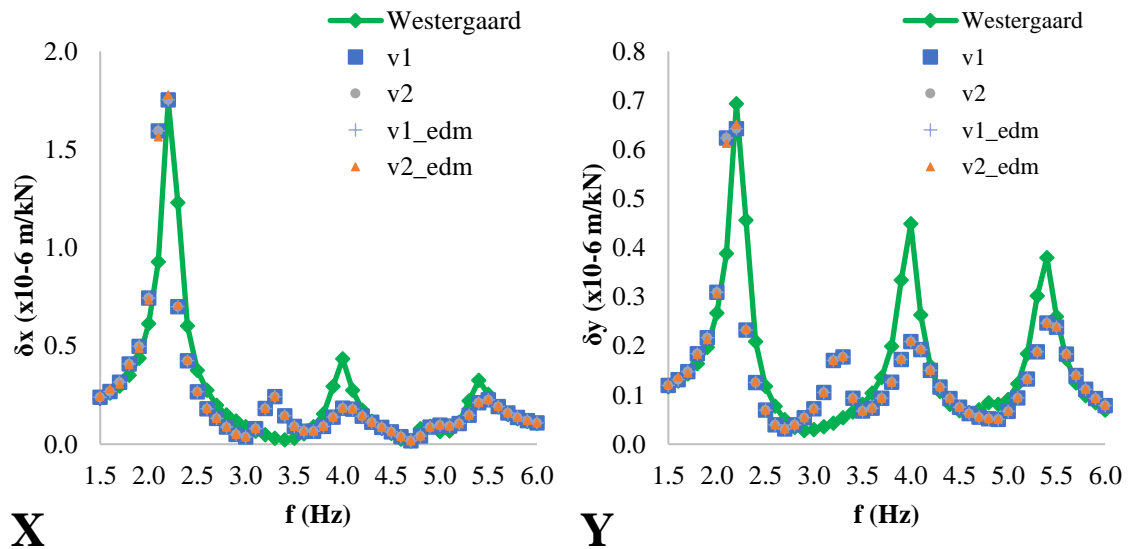


Figura 5.5 – Deslocamentos no ponto A, malha irregular

Tal como já referido, nos modelos de elementos finitos é captado mais um pico, tanto na direção x como na direção y, em relação à solução numérica das massas associadas de Westergaard. Esta multiplicidade de picos é usual quando a albufera é discretizada com elementos finitos

deformáveis (efeito da compressibilidade do fluido), sendo que nesse caso podem ser obtidos modos similares do conjunto barragem/albufeira com frequências ligeiramente diferentes.

Verifica-se igualmente que o modelo de massas associadas de Westergaard prevê para a primeira frequência uma amplitude de transferência próxima da obtida com os modelos de discretização da albufeira. No entanto, para frequências de vibração superiores, o modelo de massas associadas prevê uma maior amplitude que os modelos em que o fluido é discretizado. Por este motivo, os resultados obtidos indicam que, mesmo em barragens gravidade de paramento vertical, se devem adotar modelos de interação fluido-estrutura sempre que tal seja possível.

5.3 Barragem do Alto Lindoso

Na análise numérica realizada através de ensaios de vibração forçada numa barragem abóbada com a geometria aproximada da barragem do Alto Lindoso, foram analisadas três malhas diferentes para os elementos de fluido, mantendo sempre a mesma malha para a barragem e adaptando a malha da fundação à discretização adotada para o fluido. A Figura 5.6 apresenta o modelo numérico da barragem, formado por 424 elementos hexaédricos correspondentes a um total de 5766 pontos nodais. Os elementos hexaédricos adotados têm 20 nós e 27 pontos de Gauss. É também apresentado o ponto B, onde são calculados os deslocamentos neste estudo.

As frequências naturais obtidas através dos modelos serão comparadas com um resultado obtido experimentalmente (Câmara et al., 1995).

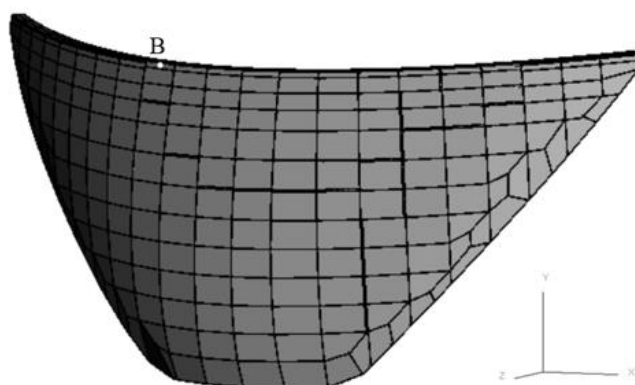


Figura 5.6 - Malha adotada para a barragem do Alto Lindoso

5.3.1 Propriedades mecânicas

Na Tabela 5.3 são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais da barragem, da fundação e do fluido e na Tabela 5.4 indicam-se as propriedades mecânicas dos elementos de interface utilizados nos modelos numéricos propostos. Consideram-se as propriedades mecânicas da fundação e do betão da barragem cerca de 1,25 vezes superiores aos valores estáticos adotados numa análise de interpretação do comportamento da barragem do Alto Lindoso realizada anteriormente (Leitão, 2011).

Neste estudo foi adotado um amortecimento de Rayleigh ($\alpha = 0.01$ e $\beta = 0.0002$).

Tabela 5.3 - Propriedades mecânicas dos materiais

	Barragem	Fundação	Fluído
Coefficiente de Poisson ν	0,20	0,20	-
Módulo de Young E [GPa]	32,00	50,00	-
Massa volúmica ρ [ton/m³]	2,40	2,60	1,00
Módulo de compressibilidade K_v [GPa]	-	-	2,00

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas dos elementos de interface

	Interfaces			
	Barragem/ Barragem	Barragem/ Fundação	Barragem/ Reservatório	Fundação/ Reservatório
k_n [GPa/m]	80,00	80,00	2,00	2,00
k_s [GPa/m]	32,00	32,00	0	0

5.3.2 Geometria e condições de apoio

Para as três malhas adotadas, foram aplicadas forças de vibração unitárias a meio do coroamento da face de montante da barragem, num intervalo de frequências de 2,5 a 5,5 Hz, em incrementos de 0,1 Hz. Para cada força de vibração por frequência, foi executada uma simulação durante 20 segundos, tempo suficiente para se atingir a estabilidade da resposta na gama de frequências adotada.

Tendo em conta que as análises de vibração forçada exigem um grande esforço computacional, a fundação foi simplificada, adotando-se somente um elemento em espessura. Na base do modelo e nas fronteiras laterais da fundação, os deslocamentos na direção normal foram restringidos. Na fronteira lateral livre da albufera foi adotada a condição de radiação na direção normal definida em 4.2.2.

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 representam, respetivamente, as malhas g , h e i , adotadas para a fundação, barragem e reservatório. Nas três malhas, o comprimento do reservatório é considerado igual a 3 vezes a altura da barragem. Com estas três diferentes discretizações procurou-se aprofundar as análises do capítulo anterior, de modo a investigar, nomeadamente, a importância da regularidade da malha no desempenho do modelo de fluido, em particular na vizinhança do paramento de montante. Assim:

- i. A malha g é a mais discretizada, sendo o reservatório definido por 5730 elementos hexaédricos que correspondem a um total de 11540 pontos nodais.
- ii. A malha h tem uma maior discretização junto à barragem e o reservatório é composto por 4011 elementos hexaédricos que correspondem a um total de 8570 pontos nodais.
- iii. A malha i é a que possui menos elementos segundo o comprimento do reservatório, sendo este composto por 1528 elementos hexaédricos que correspondem a um total de 4280 pontos nodais.

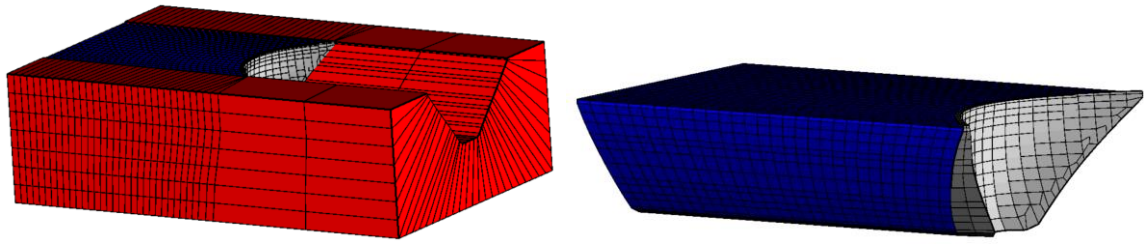


Figura 5.7 - Malha g do conjunto fundação-barragem-reservatório (barragem do Alto Lindoso)

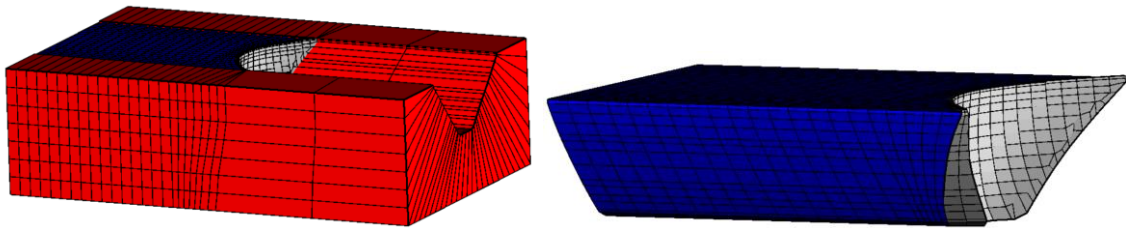


Figura 5.8 - Malha h do conjunto fundação-barragem-reservatório (barragem do Alto Lindoso)

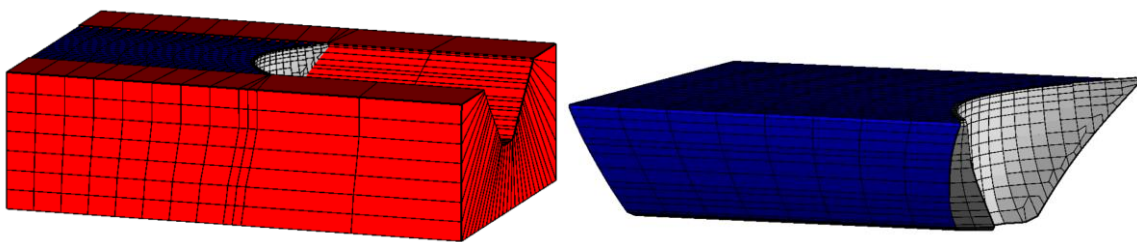


Figura 5.9 - Malha i do conjunto fundação-barragem-reservatório (barragem do Alto Lindoso)

5.3.3 Modelo numérico

Tal como no exemplo anterior, foram analisados os seguintes elementos de fluido e hipóteses de termo de penalização:

- i. (V_1) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=1000K_v$;
- ii. (V_2) elementos hexaédricos de 8 nós sub-integrados com um ponto de Gauss e $\bar{\lambda}=0$;
- iii. (V_{1_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$, com elementos fictícios sobrepostos de 8 nós sem rigidez volumétrica e $\bar{\lambda}=1000K_v$;

- iv. (V_{2_edm}) elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros e $\bar{\lambda}=0$.

5.3.4 Frequências próprias

Na Figura 5.10 são representadas as funções de transferência obtidas numericamente na direção radial para um intervalo de frequências de 2,5 a 5,5 Hz. Os resultados numéricos correspondem à solução de massas associadas de Westergaard para $\alpha=1$, $\alpha=0.7$ e $\alpha=0.8$, em que se admite que as massas associadas correspondem respetivamente a 100%, 80% e 70% do valor estimado com base na distribuição de pressões proposta por Westergaard. Tal como referido em 4.4.5, esta redução do valor das massas associadas é devida ao facto da barragem do Alto Lindoso se tratar de uma barragem abóbada e não de uma barragem gravidade de paramento vertical, para o qual foi definida a solução analítica de distribuição de pressões de Westergaard. Apresentam-se igualmente os resultados obtidos experimentalmente para um nível de albufeira igual ao adotado no modelo numérico (Câmara et al., 1995).

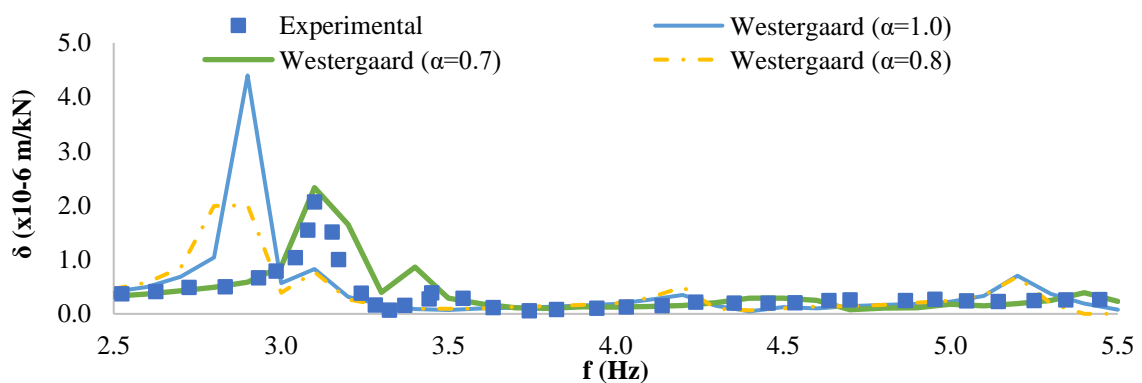


Figura 5.10 - Deslocamentos no ponto B - medição experimental e solução de Westergaard

Da análise da Figura 5.10, verifica-se que os valores obtidos experimentalmente para as duas primeiras frequências naturais da barragem são 3,10Hz e 3,45Hz, respetivamente. Observa-se que, para as propriedades elásticas adotadas (betão, fundação e albufeira), a solução de massas associadas correspondentes a 70% do valor estimado das massas totais prevê uma boa aproximação do comportamento do conjunto barragem/fundação/albufeira para o primeiro modo de vibração. Em 0 verificou-se que um valor entre 70% a 80% das massas associadas de Westergaard aproxima a distribuição de pressões obtidas na proximidade da consola central para uma aceleração constante do corpo da barragem na direção radial.

Nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 são representadas as funções de transferência na direção radial obtidas, respetivamente, com as malhas g , h e i , para um intervalo de frequências de 2,5 a 5,5 Hz, utilizando os elementos de fluido e hipóteses de termo de penalidade mencionados anteriormente. Apresenta-se também o correspondente resultado experimental (Câmara et al., 1995). Note-se que os deslocamentos indicados referem-se ao ponto B, onde se aplicou a força de vibração.

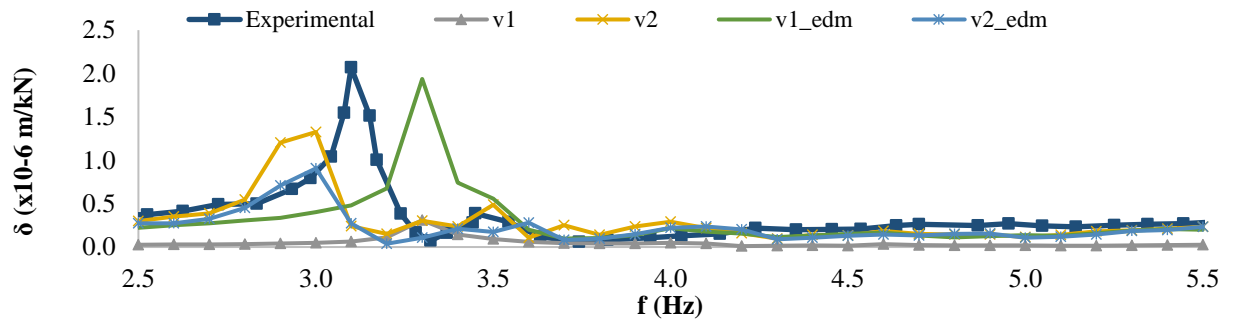


Figura 5.11 - Deslocamentos no ponto B: medição experimental e malha g com diferentes elementos

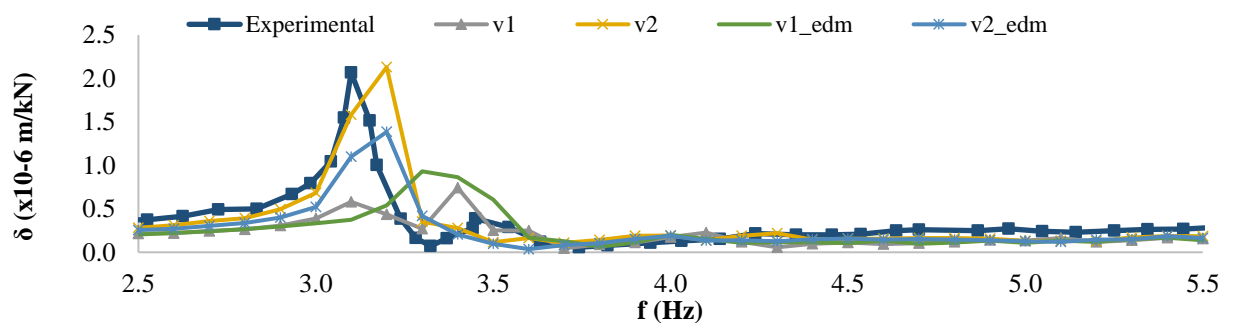


Figura 5.12 - Deslocamentos no ponto B: medição experimental e malha h com diferentes elementos

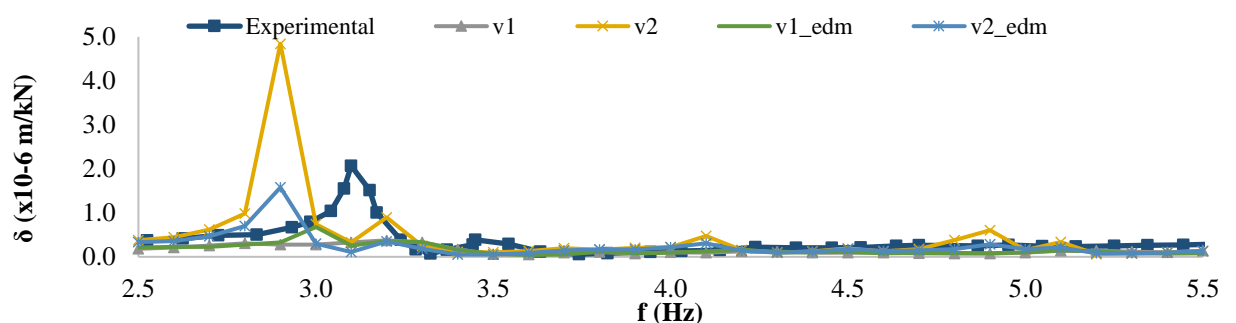


Figura 5.13 - Deslocamentos no ponto B: medição experimental e malha i com diferentes elementos

Na Tabela 5.5 apresentam-se as frequências de pico e as amplitudes para os vários tipos de elemento e coeficientes de penalização. Observa-se que o coeficiente de penalização conduz, em regra, a uma redução da amplitude associada ao modo conjunto (amplitude da função de transferência), influenciando igualmente os valores de frequência própria dos modos de vibração do conjunto barragem-fundação-albufera.

Tabela 5.5 - Frequências de pico e amplitudes para vários tipos de elemento e coeficientes de penalização - 1ª e 2ª frequências próprias

		malha g		malha h		malha i	
		Amplitude	Frequência	Amplitude	Frequência	Amplitude	Frequência
		($\times 10^{-6}$ m/kN)	(Hz)	($\times 10^{-6}$ m/kN)	(Hz)	($\times 10^{-6}$ m/kN)	(Hz)
1ª frequência própria	V ₁	0,31	3,30	0,58	3,10	0,37	3,20
	V ₂	1,33	3,00	2,13	3,20	4,84	2,90
	V _{1_edm}	9,07	3,30	0,58	3,10	0,68	3,00
	V _{2_edm}	1,94	3,00	1,36	3,20	1,58	2,90
	Experimental	2,07	3,10	2,07	3,10	2,07	3,10
2ª frequência própria	V ₁	0,05	4,00	0,74	3,40	0,11	3,80
	V ₂	0,49	3,50	0,19	4,00	0,90	3,20
	V _{1_edm}	0,22	4,00	0,20	4,00	0,34	3,30
	V _{2_edm}	0,28	3,60	0,19	4,00	0,35	3,20
	Experimental	0,39	3,45	0,39	3,45	0,39	3,45

Analisando os gráficos acima, observa-se que a malha *h*, a mais refinada junto ao paramento da barragem, é aquela em que os diferentes tipos de elemento e coeficientes de penalização apresentam resultados mais próximos entre si. Verifica-se igualmente que, para todas as malhas adotadas, os modelos onde se adota um coeficiente de penalização (Wilson & Khalvati, 1983) apresentam, quando comparados com os modelos em que não se adotam coeficiente, funções de transferência com menor amplitude de deslocamento.

Da análise das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, verifica-se que, contrariamente aos resultados obtidos na barragem gravidade Pine Flat, o elemento de 8 nós sub-integrado apresenta um comportamento ligeiramente diferente do de 8 nós de com discretização mista. É ainda de referir que no ponto 4.4.4 se observou que o elemento de 8 nós sub-integrado permite obter uma distribuição de

pressões constante no tempo para uma aceleração constante da barragem, ao contrário do elemento de 8 nós com discretização mista.

Observa-se também que a malha h é aquela com que se obtêm resultados numéricos mais próximos dos experimentais, em termos de frequências de pico e amplitudes, o que reforça a importância de se adotar uma discretização refinada na proximidade do paramento de montante, para se realizar uma transição adequada entre uma superfície de dupla curvatura e uma superfície com paramento vertical.

5.3.5 Rigidez dos elementos de interface

Neste estudo, pretende-se avaliar a influência da rigidez dos elementos de interface barragem-reservatório e fundação-reservatório, mais especificamente a influência do parâmetro k_n (rigidez normal do elemento de junta) nos deslocamentos da barragem obtidos através dos modelos numéricos.

Na análise realizada apenas se considerou a malha h , pois foi esta a malha de elementos finitos para a qual se obteve maior concordância nos resultados numéricos obtidos. Foram considerados três valores distintos para o parâmetro k_n das interfaces barragem/reservatório e fundação/reservatório, mantendo-se os restantes valores iguais aos indicados na Tabela 5.4:

- i. $k_n = 0,2 \text{ GPa}$;
- ii. $k_n = 2 \text{ GPa}$;
- iii. $k_n = 20 \text{ GPa}$.

Na Figura 5.14 são representadas as funções de transferência na direção radial obtidas para um intervalo de frequências de 2,5 a 5,5 Hz e para os três valores adotados do parâmetro k_n , utilizando os elementos e hipóteses de termo de penalização anteriormente definidos (V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}). Note-se que os deslocamentos indicados referem-se ao ponto B.

Da análise da Figura 5.14 conclui-se que os elementos com coeficiente de penalização nulo (V_2 e V_{2_edm}) apresentam funções de transferência muito próximas entre si e o efeito da variação da rigidez das interfaces barragem-reservatório e fundação-reservatório não é muito significativa. Nos modelos com coeficiente de penalização (V_1 e V_{1_edm}), as funções de transferência obtidas

numericamente são influenciadas pelo valor de rigidez das interfaces barragem-reservatório e fundação-reservatório. Estes resultados revelam que, para malhas em que os elementos de fluido não são perfeitamente cúbicos, é necessário reavaliar o valor do coeficiente de penalização a adotar, dado que o mesmo tem influência no comportamento estrutural sob ações dinâmicas.

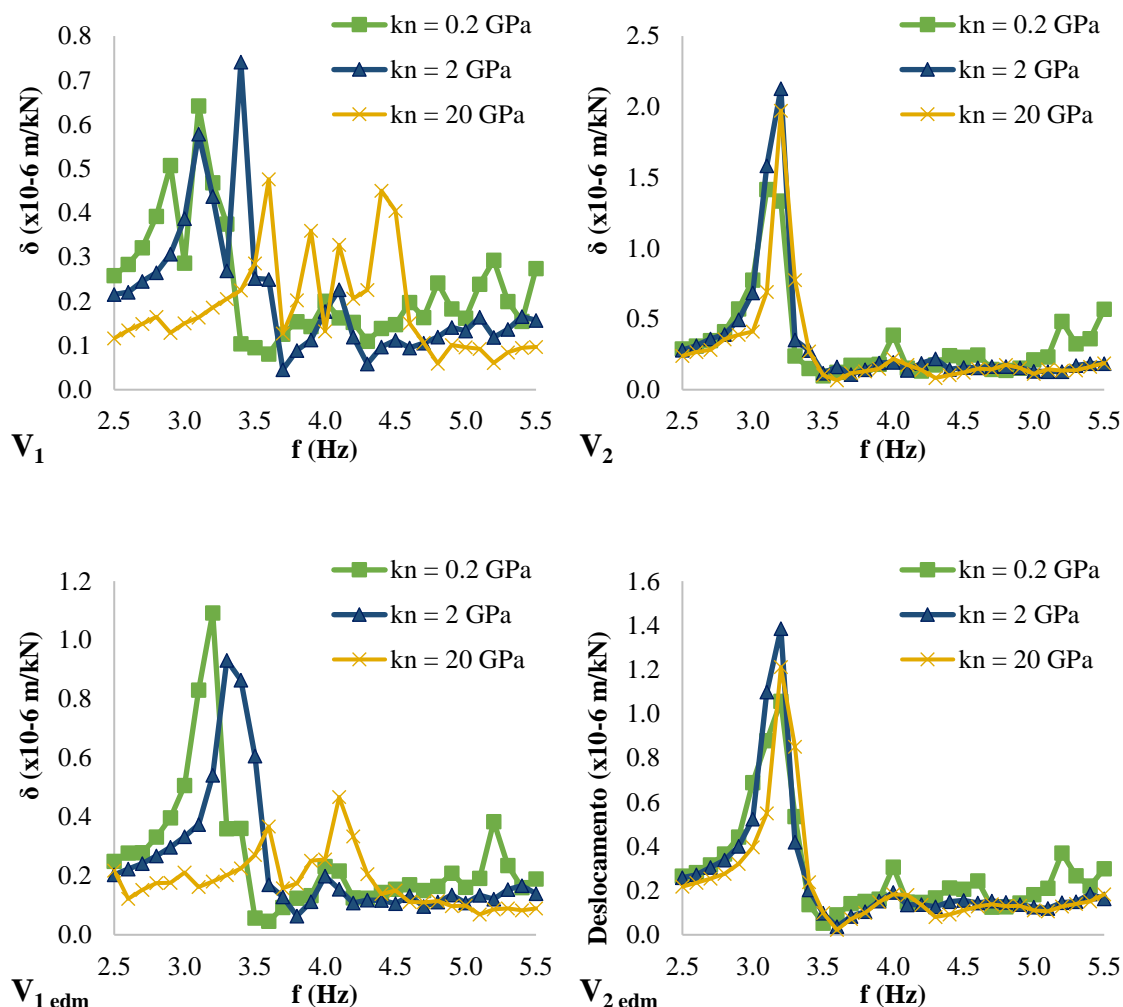


Figura 5.14 - Deslocamentos no ponto B (malha *h*): Variação da rigidez normal das interfaces do reservatório

5.3.6 Variação do amortecimento de Rayleigh

Neste estudo pretende-se avaliar a influência dos valores de amortecimento de Rayleigh adotados na modelação da resposta da barragem sob vibrações forçadas. Num primeiro estudo, foram considerados vários valores de amortecimento centrados nas duas primeiras frequências obtidas experimentalmente (Câmara et al., 1995). Numa segunda fase, foi analisada a influência da

parcela de massa do amortecimento de Rayleigh, uma abordagem usualmente adotada quando se utiliza um algoritmo de solução explícita no tempo, dado que a inclusão do amortecimento de rigidez exige passos de cálculo muito reduzidos (Azevedo et al., 2012). Tal como na análise anterior, apenas se utilizou a malha h .

5.3.6.1 Amortecimento de Rayleigh com componente de massa e de rigidez

Neste estudo, procedeu-se à variação do amortecimento de Rayleigh ($\alpha \neq 0$ e $\beta \neq 0$), de forma a analisar a influência desta variação nos deslocamentos obtidos no ponto B. Consideraram-se três valores diferentes para o amortecimento de Rayleigh, centrados nas duas frequências principais obtidas experimentalmente. Assim, analisaram-se as seguintes situações:

Estudo 1:

- i. $\xi = 0.5\%$ para a primeira frequência natural de 3,10 Hz
- ii. $\xi = 1.0\%$ para a primeira frequência natural de 3,10 Hz
- iii. $\xi = 2.0\%$ para a primeira frequência natural de 3,10 Hz

Estudo 2:

- iv. $\xi = 0.5\%$ para a segunda frequência natural de 3,45 Hz
- v. $\xi = 1.0\%$ para a segunda frequência natural de 3,45 Hz
- vi. $\xi = 2.0\%$ para a segunda frequência natural de 3,45 Hz

Nas Figuras 5.15 e 5.16 são representadas para, respetivamente, os estudos 1 e 2, as funções de transferência na direção radial obtidas para um intervalo de frequências de 2,5 a 5,5 Hz, utilizando os elementos e hipóteses de termo de penalização anteriormente definidos (V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}). Note-se que os deslocamentos indicados referem-se ao ponto B.

É possível observar que, para todos os elementos e hipóteses de termo de penalização, o aumento do valor do amortecimento de Rayleigh faz com que a amplitude de deslocamento, em especial na proximidade dos picos, tenda a reduzir-se. Tal como esperado, verifica-se que o valor de amortecimento controla a amplitude da função de transferência na proximidade dos picos,

podendo assim variar-se este parâmetro de modo a obter uma amplitude semelhante à obtida experimentalmente. Verifica-se também que definir o amortecimento com base na primeira ou na segunda frequência própria conduz a resultados numéricos muito próximos.

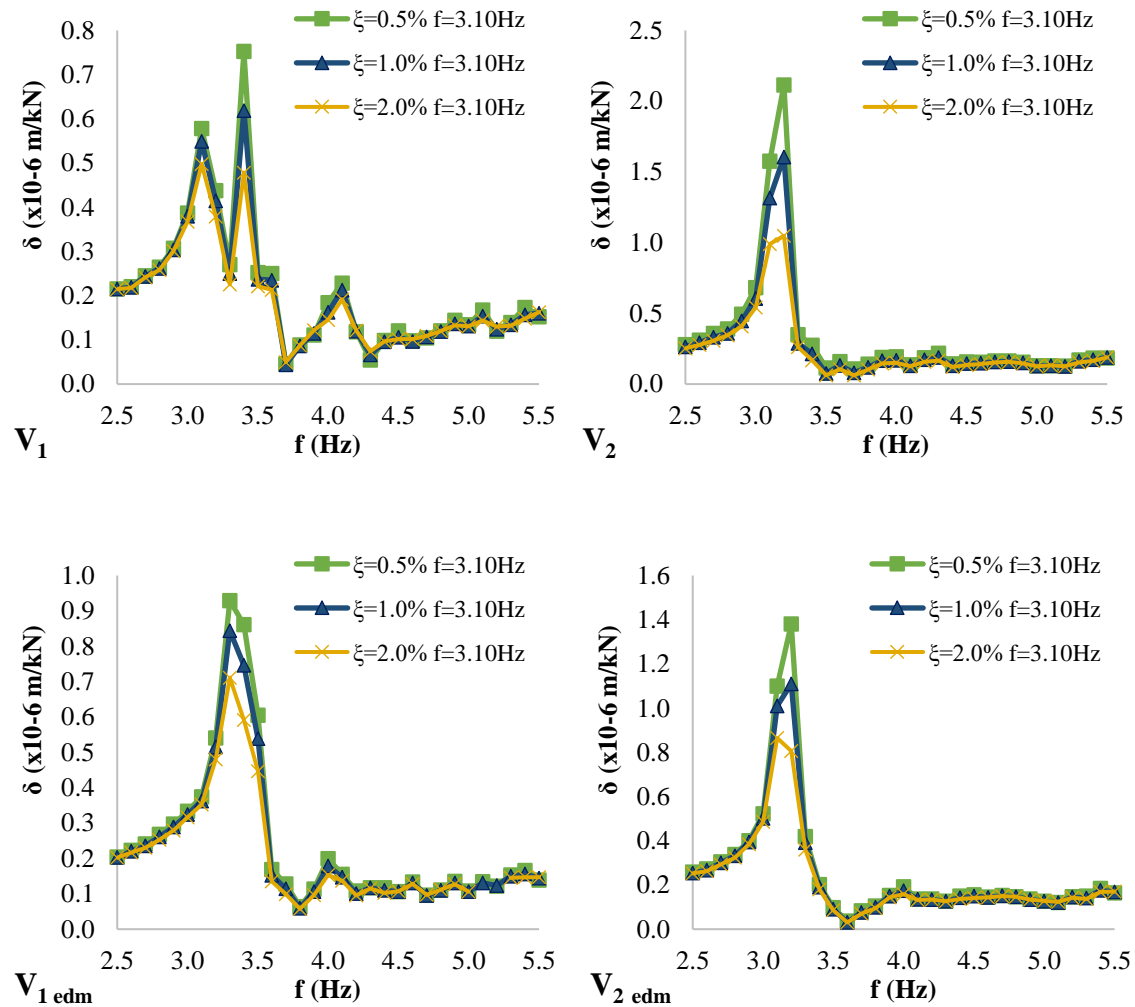


Figura 5.15 - Deslocamentos no ponto B (malha h): estudo 1, elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}

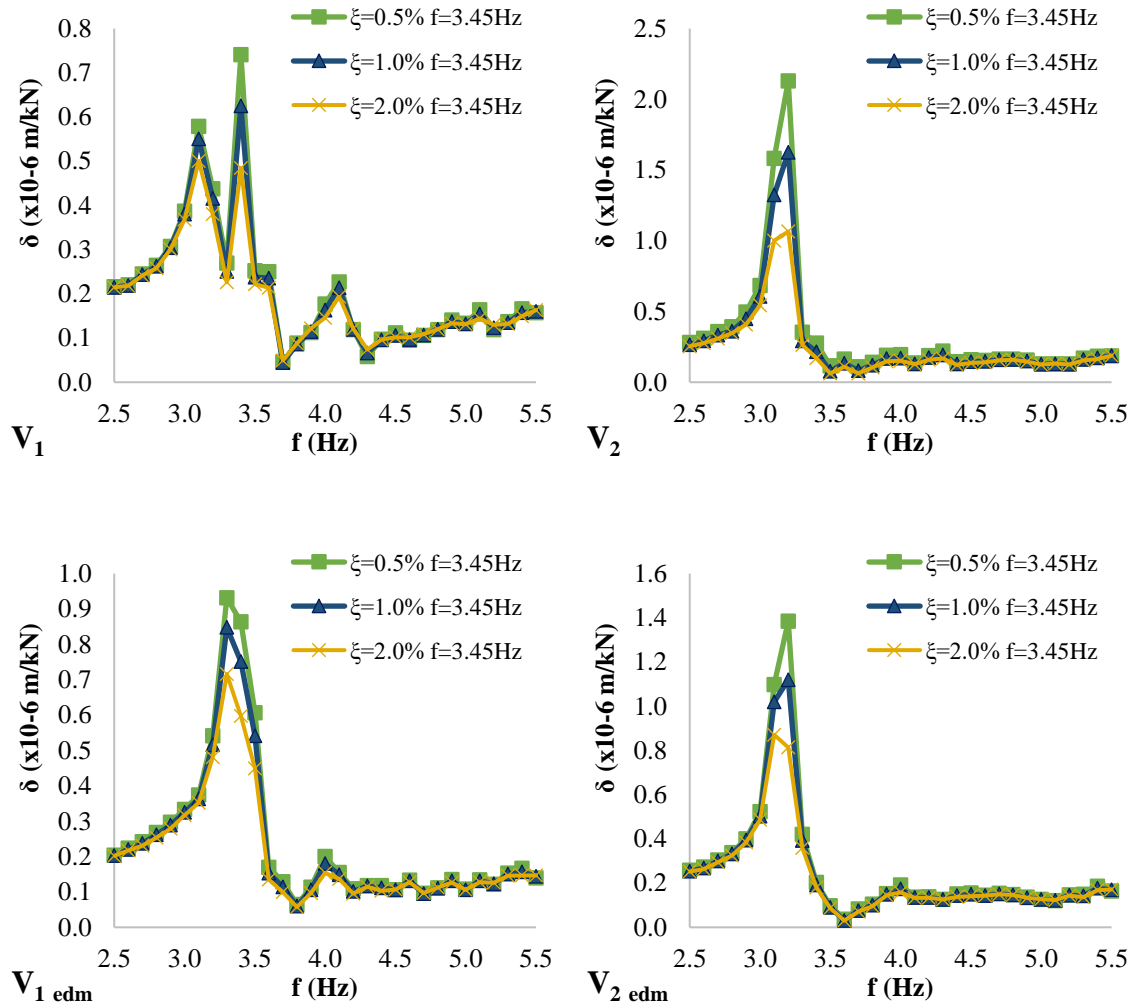


Figura 5.16 - Deslocamentos no ponto B (malha h): estudo 2, elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}

5.3.6.2 Amortecimento de Rayleigh apenas com componente de massa

Neste estudo variou-se o amortecimento de Rayleigh considerando apenas a componente de massa ($\alpha \neq 0$ e $\beta = 0$), o que, como referido anteriormente, é uma abordagem habitual quando se utiliza um algoritmo de solução explícita no tempo. Tal como na análise anterior, apenas se considerou a malha h .

Tendo em conta que as diferenças observadas entre o Estudo 1 e o Estudo 2 não foram significativas, consideraram-se três valores diferentes para o amortecimento de Rayleigh, centrado apenas numa frequência:

- i. $\xi = 0.5\%$ para a segunda frequência natural de 3,45 Hz

- ii. $\xi = 1.0\%$ para a segunda frequência natural de 3,45 Hz
- iii. $\xi = 2.0\%$ para a segunda frequência natural de 3,45 Hz

Na Figura 5.17 são representadas as funções de transferência na direção radial obtidas para um intervalo de frequências de 2,5 a 5,5 Hz, utilizando os elementos e hipóteses de termo de penalização anteriormente definidos (V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}). Note-se que os deslocamentos indicados referem-se ao ponto B. Observa-se que variação do termo de amortecimento de Rayleigh proporcional à massa conduz, para esta barragem, a resultados próximos dos obtidos com um amortecimento de Rayleigh centrado na mesma frequência.

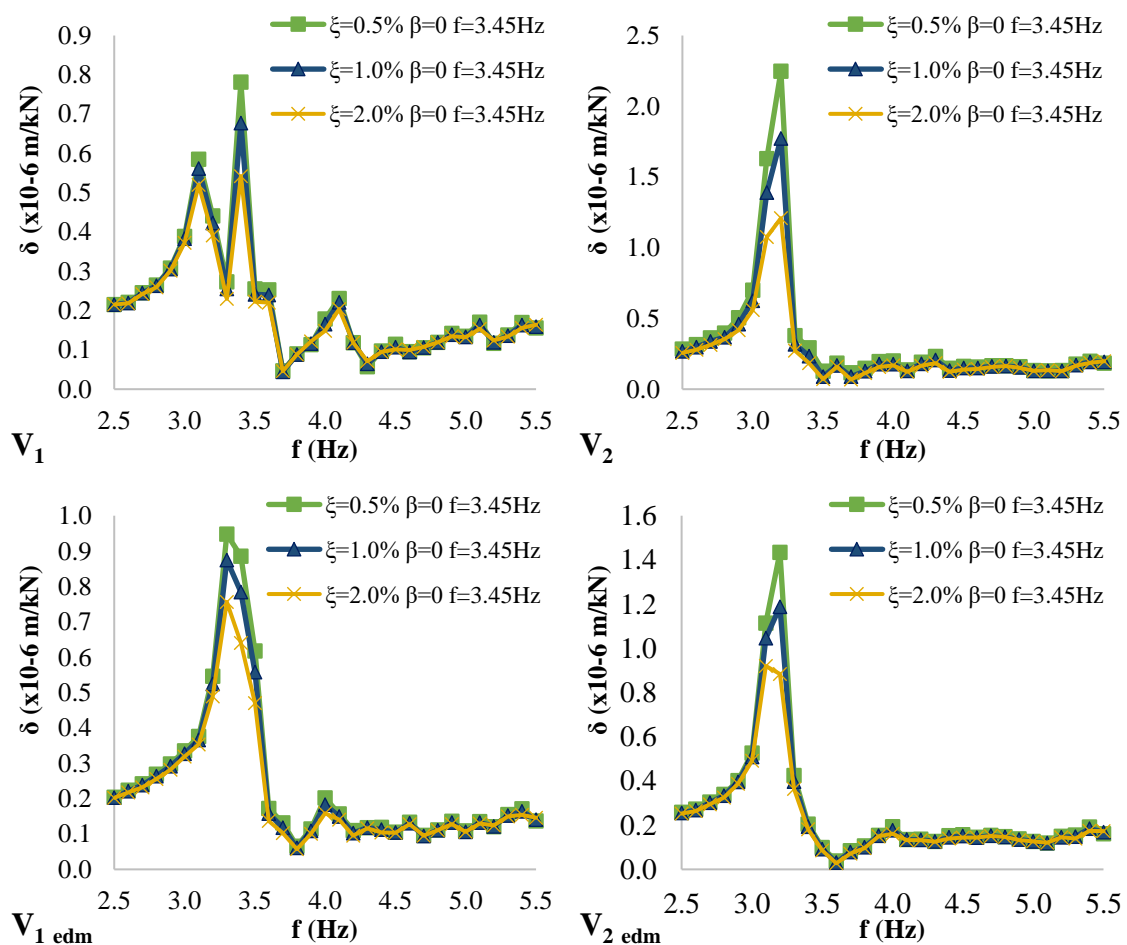


Figura 5.17 - Deslocamentos no ponto B (malha h): elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm} , com amortecimento de Rayleigh apenas com componente de massa

A Figura 5.18 representa as curvas obtidas com o modelo relativo aos elementos finitos V_2 para um amortecimento de 0,5% e para os diferentes tipos de amortecimento, Rayleigh e parcela de massa de Rayleigh. Observa-se que, ao se desprezar a componente de rigidez, obtém-se um deslocamento 3% maior na frequência natural de 3,1 Hz. Os resultados indicam que, para esta barragem e conjunto de parâmetros mecânicos adotados, a simplificação que normalmente se realiza em modelos explícitos conduz a resultados próximos dos que seriam obtidos caso se adotassem os dois termos de Rayleigh.

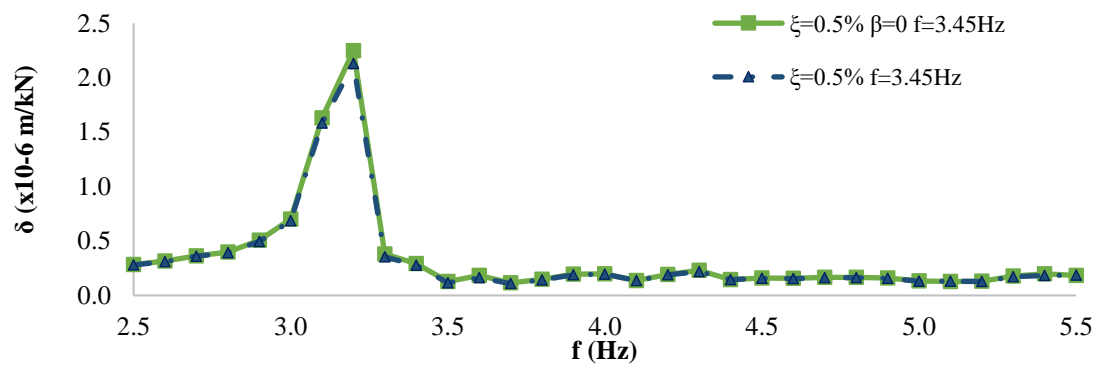


Figura 5.18 - Deslocamentos no ponto B (malha h):elemento V_2 . Comparação entre amortecimento de Rayleigh apenas com componente de massa e amortecimento de Rayleigh com ambas as componentes para 0.5%

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Aspetos relevantes dos estudos efetuados

Esta dissertação teve como objetivo avaliar o desempenho de elementos finitos em deslocamentos segundo uma formulação de Lagrange, para modelação da albufeira e da sua interação hidrodinâmica com o conjunto barragem-fundação. Foram testados dois tipos de elementos finitos, 8 nós sub-integrado e 8 nós de discretização mista, e foi avaliada a influência do termo de penalização, que tem como objetivo a limitação dos modos de circulação.

Verificou-se que os elementos finitos adotados permitem modelar adequadamente as distribuições de pressões que ocorrem para um campo de acelerações constante em altura, atuando num paramento vertical de altura h ligado a uma albufeira. Verificou-se que, para obter uma distribuição próxima da distribuição teórica proposta por Westergaard, é importante garantir um refinamento adequado na proximidade do paramento, tanto na direção vertical como na direção horizontal. Dos resultados obtidos, verifica-se ainda que os elementos finitos em deslocamento apresentam melhor desempenho caso tenham uma geometria do tipo cúbico.

Nos exemplos com paramento inclinado, verifica-se que os elementos finitos adotados conseguem modelar as distribuições de pressões que ocorrem para um campo de acelerações constante em altura, atuando num paramento inclinado de altura h ligado a uma albufeira, desde que o valor da inclinação não conduza a uma malha de elementos finitos muito distorcida. Para o exemplo estudado verificou-se que os elementos finitos adotados não conseguem reproduzir o comportamento esperado para paramentos com inclinação superior a 30° . Verificou-se que, para malhas irregulares, o termo de penalização altera ligeiramente a deformabilidade do elemento sob variações de volume, ao contrário do que sucede em elementos de 8 nós do tipo cúbico, onde o termo de rigidez não tem influência significativa sobre os modos de circulação.

No exemplo de um paramento com dupla curvatura (barragem abóbada), verifica-se que os elementos finitos adotados conseguem modelar as distribuições de pressões que ocorrem para um campo de acelerações constante em altura, atuando num paramento com dupla curvatura e altura h ligado a uma albufeira. Tal como no exemplo de paramento vertical, verificou-se que é importante garantir um refinamento adequado na vizinhança do paramento, tanto na direção vertical como na

direção horizontal. Verificou-se ainda que, por se tratar de um paramento com dupla curvatura, é necessário introduzir um fator multiplicativo α na distribuição teórica proposta por Westergaard.

Por fim avaliou-se o desempenho dos elementos finitos de fluido em ensaios de vibração forçada na barragem gravidade de Pine Flat e na barragem abóbada do Alto Lindoso. Os resultados apresentados demonstram que, para uma barragem gravidade, onde é possível adotar na discretização do fluido uma malha regular de elementos finitos, os elementos finitos de fluido conduzem todos a uma resposta numérica semelhante, independentemente do valor do termo de penalização adotado. Nos resultados numéricos em que se procedeu à discretização do fluido, foi detetado um pico adicional nas funções de transferência, quando comparados com os resultados obtidos com um modelo de massas associadas. Este fenómeno não é de estranhar, dado que modos próximos da albufeira quando combinados com modos da barragem podem resultar em modos do conjunto barragem-albufeira ligeiramente diferentes.

Os resultados numéricos obtidos nos ensaios de vibração forçada da barragem do Alto Lindoso mostram a importância de se garantir uma discretização refinada na proximidade do paramento de montante que garanta uma transição suave entre uma superfície de dupla curvatura e uma superfície vertical. Os resultados indicam também que para elementos distorcidos é necessário ter cuidado na escolha do termo de penalização dos modos de circulação, dado que o valor desse termo contribui igualmente para o comportamento do elemento sob deformações volumétricas. Os resultados obtidos no estudo paramétrico realizado indicam que é necessário escolher criteriosamente o valor da rigidez normal de interface, dado que o mesmo influencia a amplitude da resposta do conjunto barragem-albufeira. Verificou-se que, para esta barragem e para o conjunto de parâmetros adotados, a consideração de um amortecimento de Rayleigh proporcional apenas à massa conduz, na gama de frequências estudadas, a resultados próximos dos obtidos quando se adota um amortecimento de Rayleigh com ambos os termos (massa e rigidez). Este resultado é relevante, pois quando se adota um algoritmo de solução explícita no tempo é usual considerar, por razões computacionais, apenas o termo proporcional à massa.

É de referir que os exemplos estudados, interação de corpo da barragem com uma dada aceleração constante com a albufeira, e vibração forçada na proximidade de frequências de ressonância, são exemplos exigentes sob o ponto de vista da interação hidrodinâmica, quando por exemplo, comparados com uma solicitação estática ou com a análise de uma barragem sob excitação sísmica. De qualquer forma, os resultados obtidos mostram que modelos de fluido baseados numa

formulação de Lagrange podem ser adotados em estudos de barragem gravidade, desde que se garanta a regularidade da malha e um grau de refinamento adequado na vertical e na vizinhança do paramento vertical. Nestes modelos mais simples, o desempenho do elemento de 8 nós sub-integrado é semelhante ao desempenho do elemento de 8 nós de discretização mista e o termo de penalização não influencia a deformabilidade volumétrica do domínio. A aplicação deste tipo de modelos de fluido baseados numa formulação de Lagrange a barragens abóbada é mais complexa, sendo necessário maior cuidado na discretização da albufera e na transição de uma superfície com dupla curvatura para uma superfície vertical. Verifica-se que a adoção do termo de penalização pode não ser a opção mais adequada, pois em elementos distorcidos o termo de penalização influencia também a deformabilidade volumétrica do domínio fluido. Em geometrias do tipo abóbada, os estudos desenvolvidos indicam que é importante avaliar se o modelo de fluido e a discretização de elementos finitos adotados permitem obter uma estabilização de pressões para uma situação de paramento rígido com aceleração constante na direção do eixo do vale. Os resultados obtidos, nomeadamente no caso de paramento rígido com aceleração constante e no exemplo de vibração forçada, indicam igualmente que, para modelos de interação em barragens abóbada, os elementos hexaédricos de 8 nós sem coeficiente de penalização apresentam um desempenho superior aos elementos hexaédricos de 8 nós de discretização mista com tetraedros sem coeficiente de penalização.

6.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, considera-se interessante a realização dos seguintes estudos:

- Avaliação do desempenho de elementos finitos em deslocamentos, com formulação de Lagrange, na modelação da albufera, para uma ação equivalente ao sismo máximo de projeto (SMP) em modelos de barragens gravidade e abóbada;
- Análise comparativa, em modelos de barragens gravidade e abóbada, do desempenho dos elementos finitos em deslocamentos relativamente a soluções em que se adota uma formulação em pressões, para uma ação equivalente ao sismo máximo de projeto (SMP) e para ensaios de vibração forçada;
- Comparação entre a resposta dinâmica, obtida com elementos finitos em deslocamentos (formulação de Lagrange), na modelação da albufera e a resposta numérica obtida com

um modelo de massas associadas, para uma dada gama de geometrias características de barragens abóbada, de modo a calibrar o parâmetro de redução das massas associadas de Westergaard.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, A. (2015). *Análise do comportamento sísmico da barragem de Luzzone. Desenvolvimento de um programa de EF3D utilizando uma formulação em deslocamentos e pressões*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Alegre, A., Oliveira, S., Espada, M., & Lemos, J. V. (2017). Pressões hidrodinâmicas em barragens abóbada: Resultados numéricos e experimentais. *Revista Da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, 55–62.
- APA. (2018). Documentos técnicos de apoio ao regulamento de segurança de barragens (RSB). 1ª Edição.
- Azevedo, N. (2003). *A rigid particle discrete element model for the fracture analysis of plain and reinforced concrete*. Tese de Doutoramento. Heriot-Watt University.
- Azevedo, N., Bretas, E. M., & Lemos, J. V. (2012). Shear Sliding of Gravity Dams for Maximum Design Earthquake Analysis. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Azevedo, N., & Câmara, R. (2015). Dynamic analysis of concrete dams: Fluid-structure displacement-based interaction models. *Dam Engineering*, XXV(4), 1–20.
- Azevedo, N., Câmara, R., & Lemos, J. V. (2008). Modelação numérica da interacção fluido-estrutura através de uma formulação de elementos finitos em deslocamentos. *Proc. 0402/11/16117*.
- Azevedo, N., Farinha, M. B., & Schlar, N. (2019). Fluid structure displacement based interaction models for the dynamic behaviour of an arch dam. *3rd Meeting of EWG Dams and Eathquakes*, 1–12.
- Bathe, K.-J., & Wilson, E. L. (1976). *Numerical methods in finite element analysis* (N. J. Englewoor Cliffs (ed.)). Prentice-Hall.
- Calayir, Y., & Dumanoglu, A. (1993). Static and dynamic analysis of fluid and fluid-structure systems by the Lagrangian method. *Computers & Structures*, 49, 625–632.
- Câmara, R., Oliveira, S., & Gomes, J. P. (1995). Dynamic behavior of an arch dam-foundation-reservoir system: Experimental and numerical study. *Structural Dynamics - Eurodyn 96*, 703–709.

- Cervera, M., Oliver, J., & Faria, R. (1995). Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage models. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 24(9), 1225–1245.
- Gavrea, B., Negrut, D., & Potra, F. A. (2005). The Newmark integration method for simulation of multibody systems: Analytical considerations. *American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division (Publication) DE*, 118 B(2), 1079–1092. <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81770>
- Gomes, J. P., Azevedo, N., & Oliveira, S. (2016). Caracterização do comportamento dinâmico da barragem do Alto Ceira II através da realização de ensaios de vibração forçada e de ruído ambiente. *10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, 15.
- Laginha, J. S., ASCE, F., & Oliveira, J. P. (1965). Seismic study of arch dams. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 15–24.
- Leitão, N. S. (2011). Environmental thermal actions - Thermal analysis of Alto Lindoso dam. *6th International Conference on Dam Engineering*, 11.
- Lemos, J. V. (1999). Discrete element analysis of dam foundations. *Distinct Element Modelling in Geomechanics*, 90–115.
- Lemos, J. V., & Gomes, J. P. (2007). Modeling seismic failure scenarios of concrete dam foundations. *LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.
- Marti, J., & Cundall, P. (1982). Mixed discretization procedure for accurate modelling of plastic collapse. *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 6(1), 129–139.
- Oliveira, S., & Alegre, A. (2019). Seismic and structural health monitoring of dams in Portugal. *Seismic Structural Health Monitoring*, 87–113.
- Olson, L. G., & Bathe, K.-J. (1983). *A study of displacement-based fluid finite elements for calculating frequencies of fluid and fluid-structure systems*. 76, 137–151.
- RPB. (2018). *Regulamento de Pequenas Barragens*. Decreto-Lei 344/2007 de 15 de Outubro, Diário da República.
- RSB. (2018). *Regulamento de Segurança de Barragens*. Decreto-Lei 344/2007 de 15 de Outubro, Diário da República.
- Salamon, J. W. (2011). Seismic induced loads on spillway gates phase I – Literature review. *Managing Water in the West, September*, 35.
- USACE. (2003). Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures. *Engineering*

and Design.

- Valente, S., He, Q., & Capriulo, C. (2019). Seismic analysis of Pine Flat concrete dam. *Numerical Analysis of Dams*, 91, 339–351. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51085-5_18
- Westergaard, H. M. (1931). Water pressures on dams during earthquakes. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 98(2), 418–433.
- Wieland, M. (2014). Seismic hazard and seismic design and safety aspects of large dam projects. *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*, 627–650. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3>
- Wieland, M. (2016). Safety aspects of sustainable storage dams and earthquake safety of existing dams. *Engineering*, 2(3), 325–331. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.011>
- Wilson, E., & Khalvati, M. (1983). Finite elements for the dynamic analysis of fluid-solid systems. *Numerical Methods in Engineering*, 19(11), 1957–1668.
- Zangar, C. N. (1952). *Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquake effects*. Bureau of Reclamation.

ANEXO I - SOLUÇÃO DE WESTERGAARD PARA A DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES HIDRODINÂMICAS NUMA BARRAGEM DE PARAMENTO VERTICAL

Em 1931, Westergaard publicou um estudo sobre a distribuição de pressões hidrodinâmicas exercidas numa barragem de paramento vertical, durante um sismo. Neste estudo, Westergaard apresentou uma solução para a distribuição de pressões na água para um sistema barragem-reservatório em duas dimensões.

Solução exata de Westergaard

O movimento devido ao sismo de uma barragem rígida de paramento vertical, altura h e reservatório infinito, foi definido matematicamente com base na teoria da elasticidade dos sólidos, tendo em conta a formulação de Lamb (Salamon, 2011). O modelo físico, em duas dimensões, do sistema barragem-reservatório é descrito através de duas equações de movimento, uma relação linear cinemática para pequenas deformações e uma equação elástica constitutiva sem forças de corte, juntamente com as condições de fronteira (forças iguais a zero na superfície do reservatório e deslocamento vertical igual a zero na base do reservatório). A solução para a distribuição de pressões, proposta por Westergaard é dada por (Westergaard, 1931):

$$\sigma(x, y, t) = -\frac{8\alpha wh}{\pi^2} \cos\frac{2\pi t}{T} \sum_{1,3,5\dots}^n \frac{1}{n^2 c_n} e^{-q_n} \sin\frac{n\pi y}{2h} \quad (\text{A1.1})$$

$$q_n = \frac{n\pi c_n x}{2h} \quad c_n = \sqrt{1 - \frac{16wh^2}{n^2 g k T^2}}$$

De acordo com (A1.1), a pressão máxima p ocorre quando a barragem se encontra em posições extremas ($t=0$, $t=T$, $t=2T$, etc.) durante o movimento. Assim, a distribuição máxima da pressão da água no paramento vertical da barragem ($x=0$, $q_n=0$) pode ser expressa por:

$$p(x, y, t) = -\frac{8\alpha wh}{\pi^2} \sum_{1,3,5,\dots}^n \frac{1}{n^2 c_n} \sin \frac{n\pi y}{2h} \quad (\text{A1.2})$$

$$c_n = \sqrt{1 - \frac{16wh^2}{n^2 g k T^2}}$$

onde x é o eixo horizontal que parte da superfície da água no ponto de contacto com a barragem em direção a montante, y é o eixo vertical com sentido de cima para baixo, w é o peso volúmico da água, g é a aceleração gravítica, α é a máxima aceleração na fundação dividida por g , T é o período da vibração horizontal na fundação, t é o tempo e k é o módulo de elasticidade da água.

A solução, expressa na Equação (A1.2), baseia-se nas seguintes premissas:

- i. O paramento de montante da barragem é reto e vertical;
- ii. A barragem não se deforma e é considerada como um bloco rígido;
- iii. As oscilações sinusoidais da barragem são verticais;
- iv. São assumidos pequenos deslocamentos durante o sismo;
- v. O problema é definido em duas dimensões;
- vi. O período de vibração da barragem, T_0 , é bastante inferior ao período de vibração, T , do sismo (não é expectável ocorrência de ressonância);
- vii. $\alpha = 0,1$;
- viii. O efeito de compressibilidade da água é considerado como pequeno, no intervalo de frequências das oscilações que são supostas ocorrer devidas ao sismo.

Solução aproximada de Westergaard

A solução aproximada proposta por Westergaard é dada por uma parábola que representa a pressão hidrodinâmica da água na face do paramento vertical da barragem, de acordo com:

$$p = 0.875\alpha(hy)^{0.5} \quad (\text{A1.3})$$

Esta expressão é muito utilizada em cálculos preliminares para estimar a pressão hidrodinâmica numa barragem.

Comparação entra as soluções exata e aproximada de Westergaard

Com o intuito de comparar as soluções propostas por Westergaard, a Figura A1.1 apresenta a distribuição de pressões hidrodinâmicas na face do paramento vertical de uma barragem com 100 m de altura e uma aceleração aplicada de 0,0001 m/s².

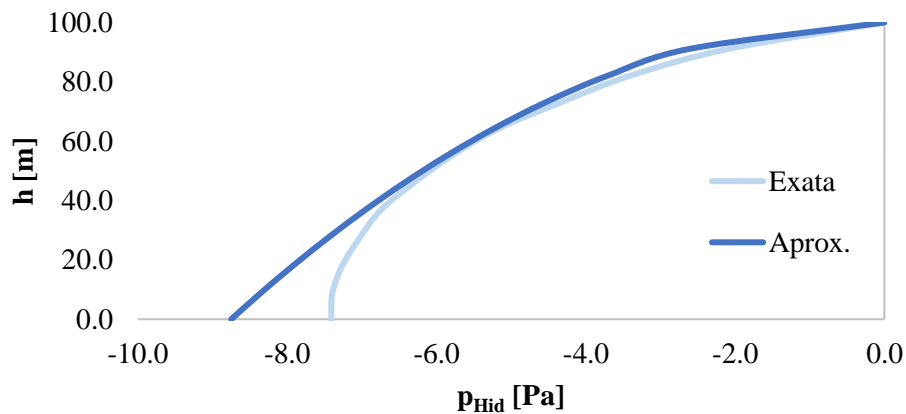


Figura A1.1 - Pressões hidrodinâmicas numa barragem com 100 m de altura: soluções de Westergaard

Conclui-se, portanto, que a solução aproximada proposta por Westergaard sobrestima as pressões hidrodinâmicas comparativamente com a solução exata, pelo que a utilização desta expressão nos cálculos preliminares da pressão hidrodinâmica de uma barragem situa-se no lado da segurança.

ANEXO II - SOLUÇÃO DE ZANGAR PARA A DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES HIDRODINÂMICAS NUMA BARRAGEM DE PARAMENTO INCLINADO

Zangar publicou em 1952, um estudo sobre a distribuição de pressões hidrodinâmicas em barragens de paramento inclinado, durante um sismo. Com base em resultados experimentais obtidos para diversas inclinações do paramento da barragem, Zangar definiu a seguinte expressão parabólica, que aproxima estes resultados (Zangar, 1952).

$$c = \frac{C_m}{2} \left[\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right) + \sqrt{\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right)} \right] \quad (\text{A2.1})$$

onde C é um coeficiente de pressão, C_m é o valor máximo de C obtido através da figura A2.1, y é a profundidade da albufeira e h é a altura da barragem.

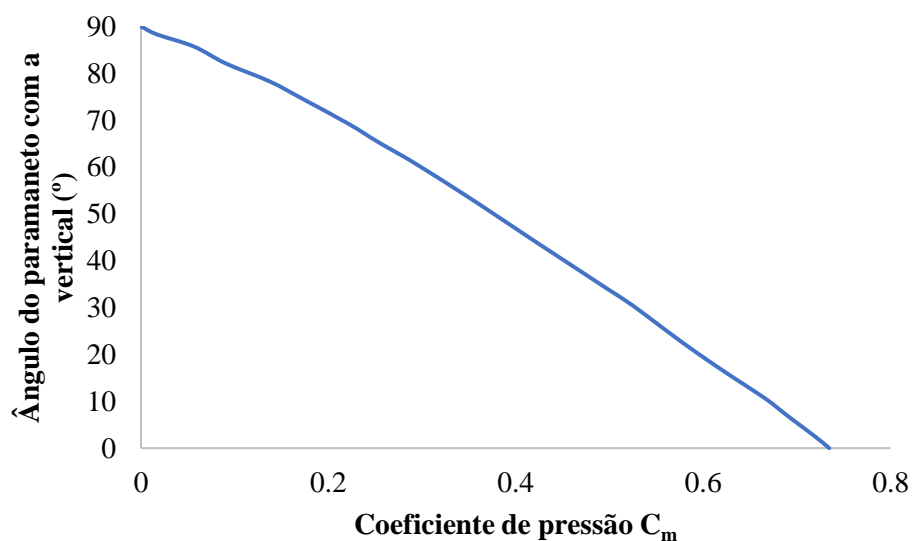


Figura A2.1 - Coeficiente de pressão para inclinações constantes do paramento

Para obter as pressões hidrodinâmicas, basta aplicar a seguinte equação:

$$P = -C \times h \times a \quad (\text{A2.2})$$

onde a é a aceleração imposta na barragem.

A Figura A2.2 apresenta a comparação entre as distribuições experimentais de pressões e a solução empírica de Zangar, para uma barragem com 100 m de altura e inclinação de 0°, 15° ou 30°.

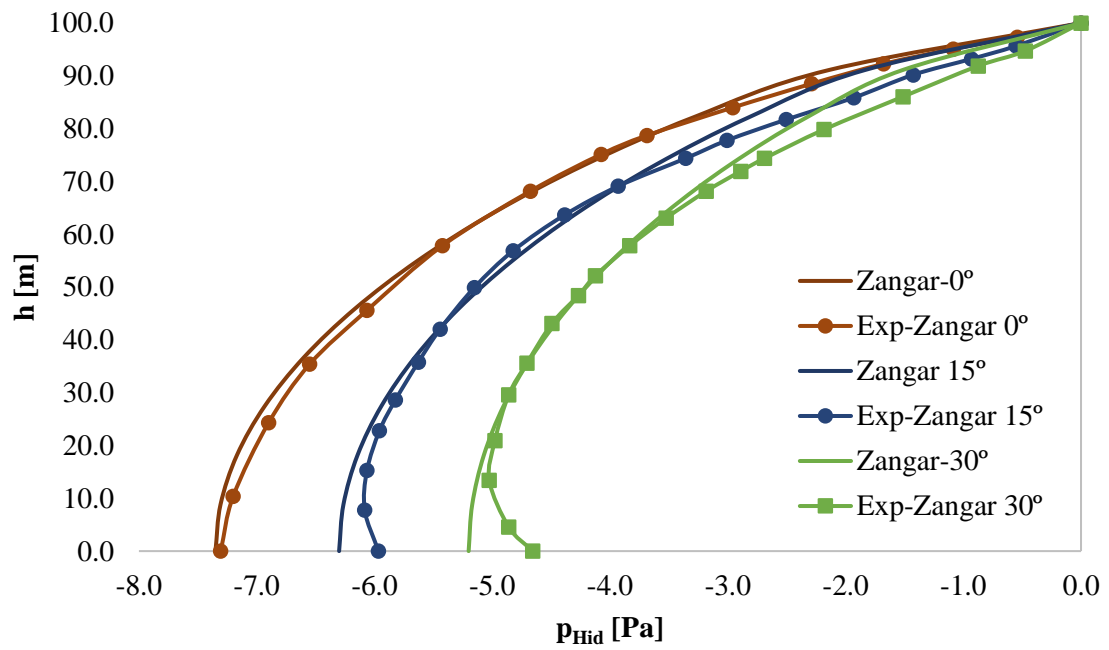


Figura A2.2 - Comparação de pressões obtidas experimentalmente com a solução empírica de Zangar

ANEXO III – VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PARMAC3D-FFLOW

De forma a verificar e validar o programa Parmac3D-Fflow, foi analisada uma consola com o objetivo de comparar os valores obtidos com o programa com os valores fornecidos pelas expressões analíticas. Foram comparados valores de frequências próprias e de deslocamentos, tanto em regime de vibração livre como em regime de vibração amortecida.

Analizou-se também um pórtico, de forma a avaliar a influência da rigidez dos elementos de interface no deslocamento a meio vão, comparando os resultados numéricos com os obtidos através das expressões analíticas.

Consola

A Figura A3.1 representa a geometria adotada para uma consola com 10 m de vão e secção transversal retangular com 1 m de largura e 2 m de altura. Em termos de condições de apoio, a viga encontra-se encastrada na face esquerda. Numa primeira análise foi apenas tido em conta o peso próprio da consola.

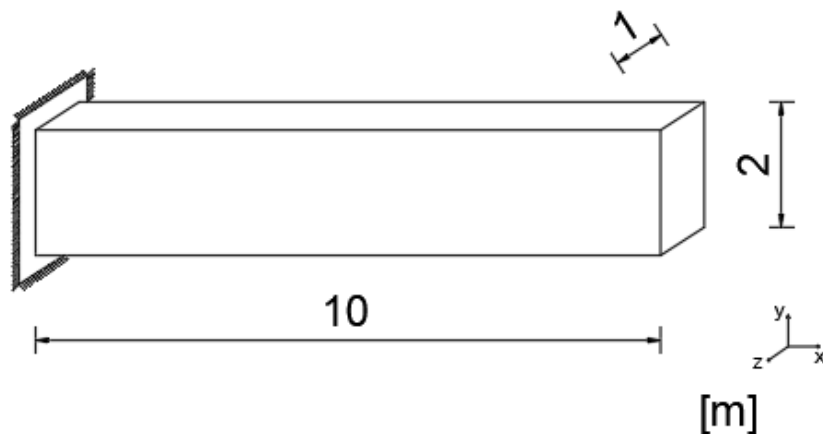


Figura A3.1 - Geometria do modelo da consola

Propriedades mecânicas da consola

As características mecânicas adotadas para a consola são apresentadas na Tabela A3.1.

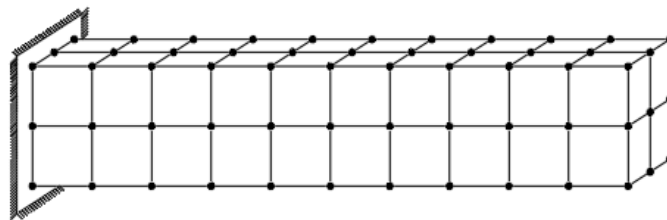
Tabela A3.1 - Propriedades mecânicas e mássicas da consola

Coefficiente de Poisson ν	0,20
Módulo de Young E [GPa]	20
Massa volúmica ρ [ton/m³]	2,40

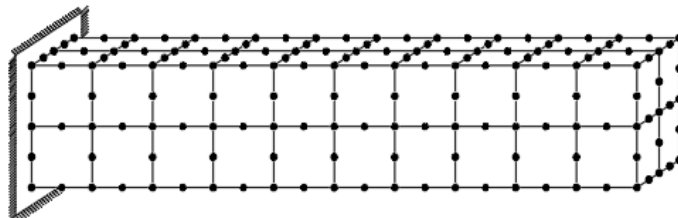
Modelo numérico

Através do programa Parmac3D-Fflow foram analisadas duas malhas que apenas diferem no tipo de elemento. A geometria dos elementos adotados para ambas as malhas foram hexaedros de 1 m de comprimento e 0,5 m de largura e altura, com 8 nós para uma malha e 20 nós para a outra.

Os dois modelos numéricos adotados são apresentados na Figura A3.2.



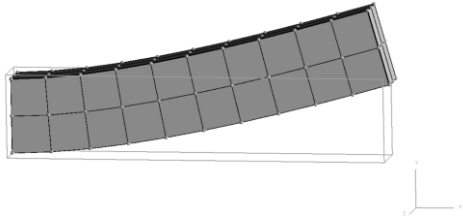
a) Malha de hexaedros de 8 nós



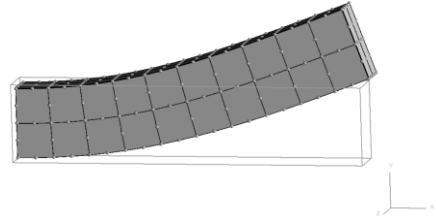
b) Malha de hexaedros de 20 nós

Figura A3.2 - Tipos de malha adotados

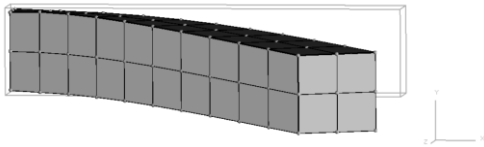
Na Figura A3.3 apresentam-se as deformadas segundo os eixos y e z para ambas as malhas, por ação de uma carga pontual de 10kN na extremidade livre, orientada segundo z (Figuras A3.3a e A3.3b) e segundo y (Figuras A3.3c e A3.3d).



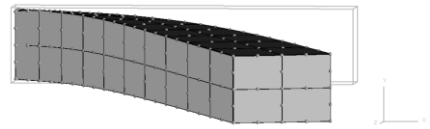
a) Deformada em y – 8nós



b) Deformada em y – 20nós



c) Deformada em z – 8nós



d) Deformada em z – 20nós

Figura A3.3 - Deformadas da consola

Solução analítica – Frequências próprias

Sabe-se, através do modelo de viga de Euler-Bernoulli (teoria das vigas), que a primeira frequência natural de uma consola é dada pela expressão (A3.1).

$$\omega = 1.875^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (\text{A3.1})$$

onde **E** representa o módulo de elasticidade (Pa), **I** o momento de inércia da secção (m⁴), **ρ** a densidade do material (kg/m³), **A** a área da secção (m²) e **L** o comprimento da consola (m).

Frequências próprias – Valores e vetores próprios

Na Tabela A3.2 apresentam-se os resultados obtidos para a primeira frequência natural de uma consola analisada com o programa Parmac3D-Fflow, assim como o correspondente valor teórico fornecido pela teoria das vigas.

Tabela A3.2 - Primeira frequência natural

Frequência natural [Hz]					
Parmac3D-Fflow				Solução analítica	
8nós		20nós			
y	z	y	z	y	z
5,55	9,58	4,64	9,06	4,66	9,33

Comparando os resultados obtidos, conclui-se que a malha de hexaedros de 20 nós apresenta um resultado mais próximo da solução analítica, com uma diferença inferior a 1% para a primeira frequência natural em y.

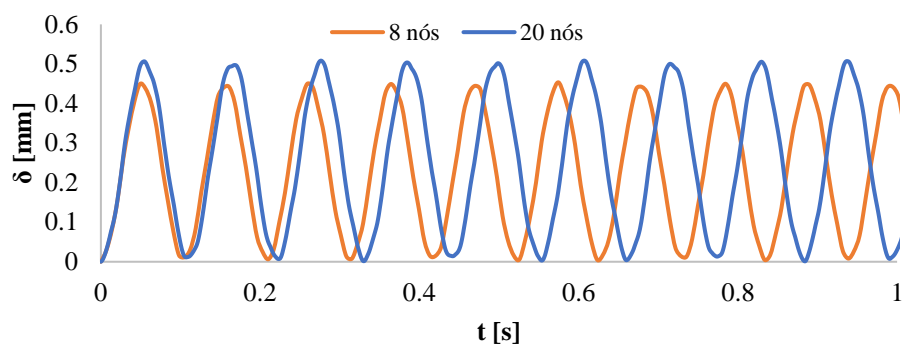
Frequências próprias – Vibração livre

Foram realizadas análises numéricas considerando cargas pontuais de 10 kN aplicadas na extremidade livre, segundo y e segundo z, separadamente. Ambos os casos foram analisados em regime de vibração livre e em regime de vibração amortecida.

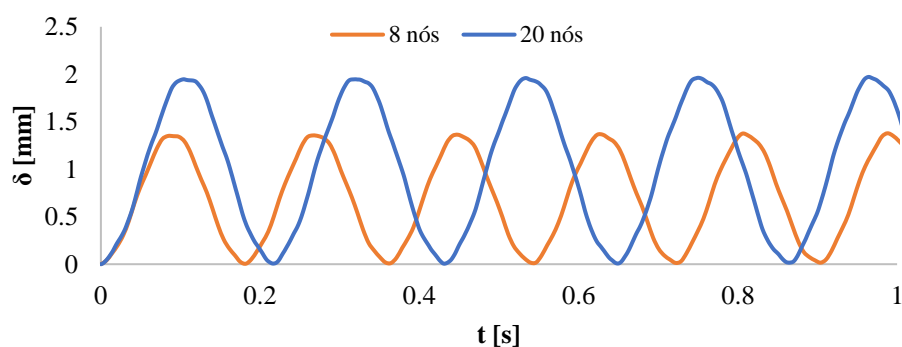
Na análise em regime de vibração livre, foi possível, através dos gráficos da Figura A3.3, calcular as frequências naturais da consola de acordo com a Equação (A3.2), pois consegue-se quantificar a partir dos gráficos o período em segundos (distância entre dois pontos máximos ou mínimos do gráfico). As primeiras frequências naturais são apresentadas na Tabela A3.3.

$$\omega = \frac{1}{T} \quad (\text{A3.2})$$

onde **T** é o período (s).



a) Deslocamento da extremidade livre da consola segundo o eixo y



b) Deslocamento da extremidade livre da consola segundo o eixo z

Figura A3.3 - Deslocamento em função do tempo na extremidade livre da consola em regime de vibração livre

Tabela A3.3 – Primeira frequência natural em regime de vibração livre

Frequência natural [Hz]					
Parmac3D-Fflow				Solução analítica	
8 nós		20 nós			
y	z	y	z	y	z
5,56	9,39	4,61	9,09	4,66	9,33

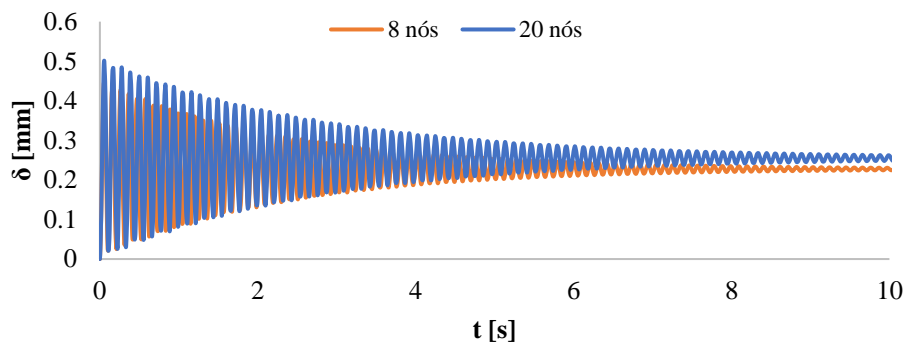
Comparando novamente os resultados obtidos com a solução analítica, a malha de hexaedros de 20 nós é a que apresenta os melhores resultados globais, pois, como se pode verificar na tabela A3.3, embora a malha de hexaedros de 8 nós apresente um resultado mais próximo da solução analítica para a frequência segundo y, a malha de hexaedros de 20 nós apresenta uma melhor aproximação da solução analítica para a frequência segundo z.

Vibração amortecida

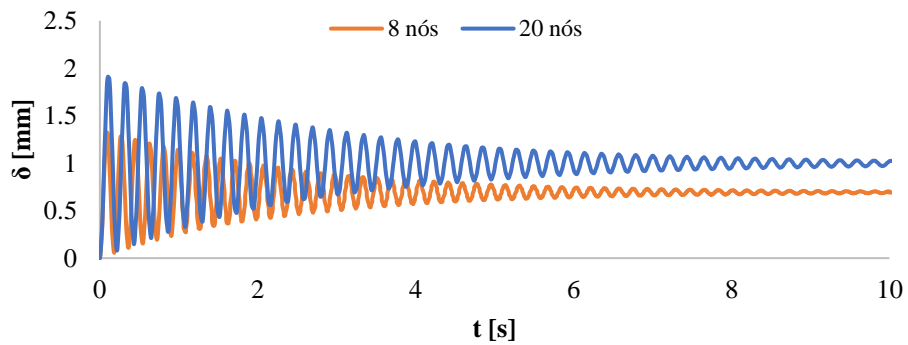
Na análise em regime de vibração amortecida, compararam-se os deslocamentos obtidos na extremidade livre da consola, Figura A3.4, com o deslocamento teórico segundo a teoria das vigas, dado pela Equação (A3.3). Estes deslocamentos são apresentados na tabela A3.4.

$$\delta = \frac{P L^3}{3 E I} \quad (\text{A3.3})$$

onde P representa a força pontual aplicada (kN).



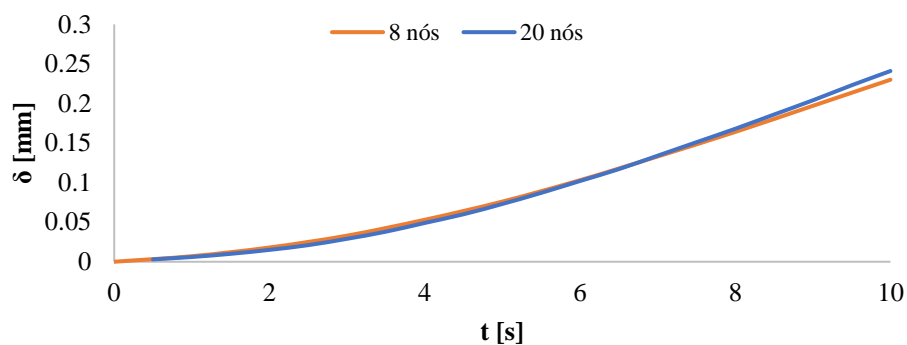
a) Deslocamento da extremidade livre da consola segundo o eixo y



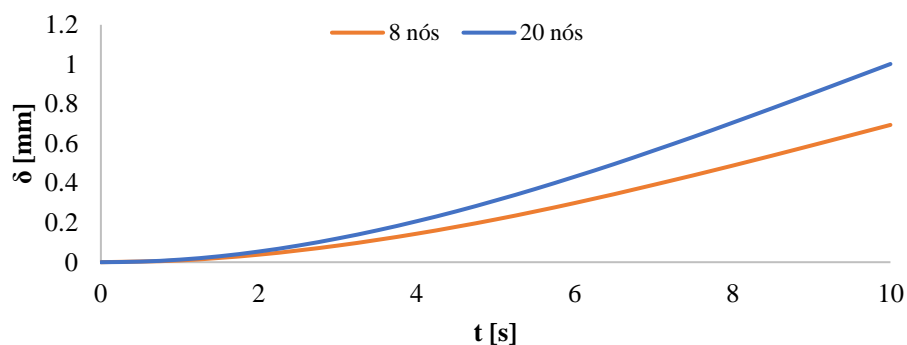
b) Deslocamento da extremidade livre da consola segundo o eixo z

Figura A3.4 - Deslocamento da extremidade livre da consola em regime de vibração amortecida

Na Figura A3.5 são apresentados os deslocamentos ao longo da consola, após se atingir o equilíbrio estático.



a) Deslocamento ao longo da consola segundo o eixo y



b) Deslocamento ao longo da consola segundo o eixo z

Figura A3.5 -Deslocamentos ao longo da consola em regime de vibração amortecida

Tabela A3.4 - Deslocamento na extremidade livre em regime de vibração amortecida

Deslocamento [mm]					
Parmac3D-Fflow				Solução analítica	
8nós		20nós			
y	z	y	z	y	z
0,23	0,69	0,24	1,00	0,25	1,00

Comparando os resultados obtidos através do programa com a solução analítica, é possível verificar que a malha de elementos hexaédricos de 20 nós apresenta resultados bastante próximos da solução analítica, pelo que se pode concluir que estes elementos são adequados para o caso em estudo. Tal como esperado, o elemento de 20 nós com funções de interpolação do 2º grau apresenta um desempenho superior ao elemento de 8 nós com funções de forma lineares.

Pórtico – Avaliação dos elementos de interface

A Figura A3.6 representa a geometria adotada para um pórtico composto por dois pilares e uma viga. Os pilares têm 5 m de altura e secção transversal quadrada com 1 m de lado enquanto a viga tem 10 m de comprimento e secção quadrada com 1 m de lado. Em termos de condições de apoio, os pilares encontram-se encastrados na base e a ligação entre a viga e os pilares é feita através de elementos de interface.

Nesta análise faz-se variar a rigidez normal e a rigidez de corte destes elementos de interface, de forma a comparar os resultados obtidos numericamente (tensões e deslocamentos) com os valores teóricos, tanto para uma viga simplesmente apoiada como para uma viga bi-encastrada. É ainda analisada um modelo de comportamento não linear do elemento de interface.

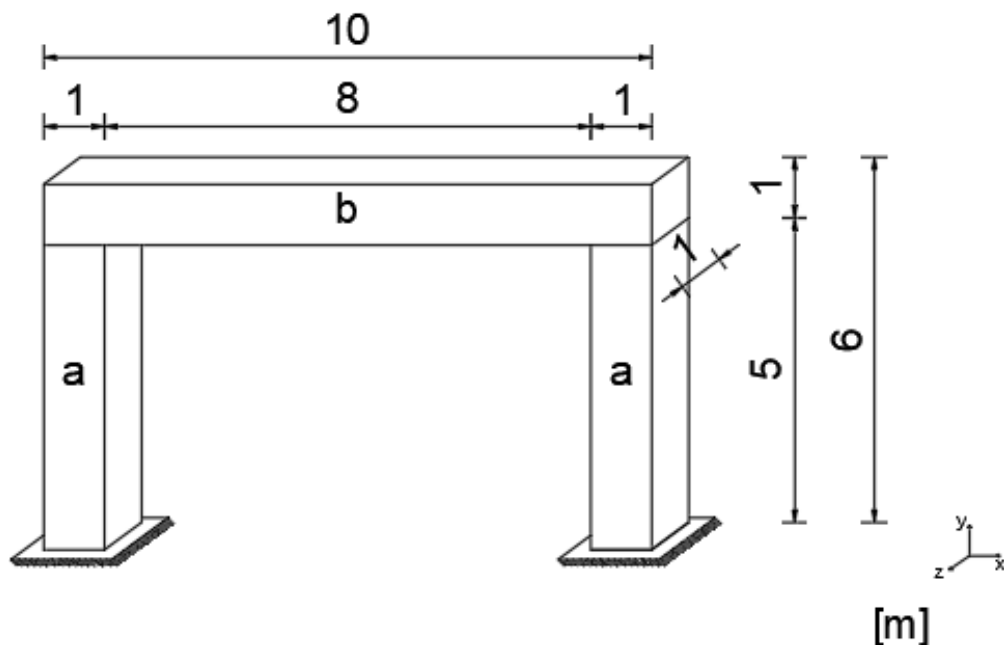


Figura A3.6 - Geometria do modelo do pórtico

Propriedades mecânicas do pórtico

As características mecânicas e mássicas adotadas para o pórtico são apresentadas na Tabela A3.5.

Tabela A3.5 – Propriedades mecânicas e mássicas do pórtico

	Material a	Material b
Coefficiente de Poisson ν	0,20	0,15
Módulo de Young E [GPa]	30	20
Massa volúmica ρ [ton/m³]	2,40	2,60

Modelo numérico

No modelo numérico utilizado no programa Parmac3D-Fflow foi analisada uma malha composta por hexaedros de 20 nós, de dimensões 0,25x1,00x0,20 m nos pilares e 0,25x0,2x0,2 m na viga. A malha adotada é apresentada na Figura A3.7.

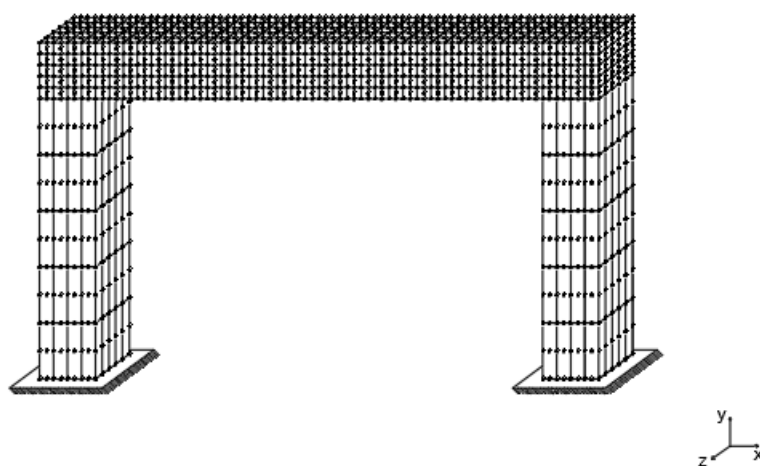


Figura A3.7 – Malha adotada para o pórtico

Na Figura A3.8 é apresentada a deformada do pórtico para a ação equivalente ao peso próprio e admitindo comportamento elástico nos elementos de interface.

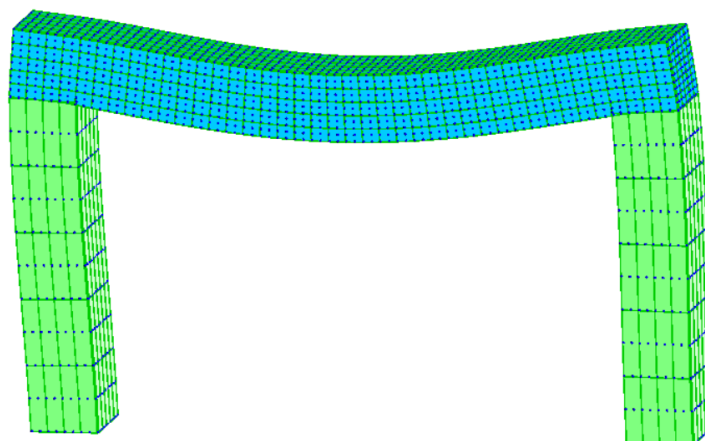


Figura A3.8 – Deformada do pórtico

De forma a fazer variar a rigidez normal e de corte dos elementos de interface, foram consideradas 4 espessuras fictícias diferentes para os elementos de junta. Os valores de rigidez normal e tangencial são definidos com base no módulo de Young, no valor de espessura fictícia e na relação rigidez normal/tangencial (ver Equações (A3.4) e (A3.5)) e são apresentados na Tabela A3.6.

$$k_n = \frac{E}{t} \quad (\text{A3.4})$$

$$k_s = 0.4K_n \quad (\text{A3.5})$$

Onde **E** representa o módulo de Young (GPa) e *t* a espessura fictícia (m).

Tabela A3.6 – Rigidez dos elementos de interface

		t [m]			
		0,01	0,1	1	10
Material a	k _n [GPa/m]	3000	300	30	3
	k _s [GPa/m]	1200	120	12	1.2
Material b	k _n [GPa/m]	2000	200	20	2
	k _s [GPa/m]	800	80	8	0,8

Solução analítica

O deslocamento a meio vão de uma viga encastrada em ambas as extremidades é dado pela Equação (A3.6) e o deslocamento a meio vão de uma viga simplesmente apoiada é dado pela Equação (A3.7).

$$\delta = \frac{p L^4}{384 E I} \quad (\text{A3.6})$$

$$\delta = \frac{5 p L^4}{384 E I} \quad (\text{A3.7})$$

onde **p** representa a carga aplicada (kN/m), **L** o comprimento da viga (m), **E** o módulo de Young (kPa) e **I** o momento de inércia (m⁴).

Através da teoria das vigas, sabe-se que a tensão numa dada secção pode ser calculada pela expressão:

$$\sigma = \frac{M_y z}{I_y} \quad (\text{A3.8})$$

onde **M_y** representa o momento fletor (kNm), **I** o momento de inércia da secção em torno de y (m⁴) e **z** a distância da fibra tracionada ou comprimida à linha neutra (m).

Análise de Resultados

Nas Figuras A3.10 e A3.11 são apresentadas as tensões segundo x, medidas nos alinhamentos dos nós A, B e C e dos nós D, E e F, representados na figura A3.9, para as diferentes hipóteses de rigidez adotadas. Considera-se ainda a hipótese de comportamento não linear da interface de ligação (NL).

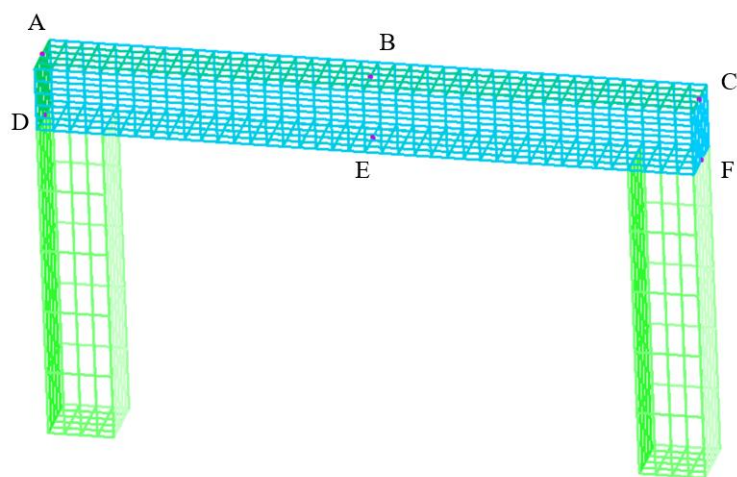


Figura A3.9 – Localização dos nós

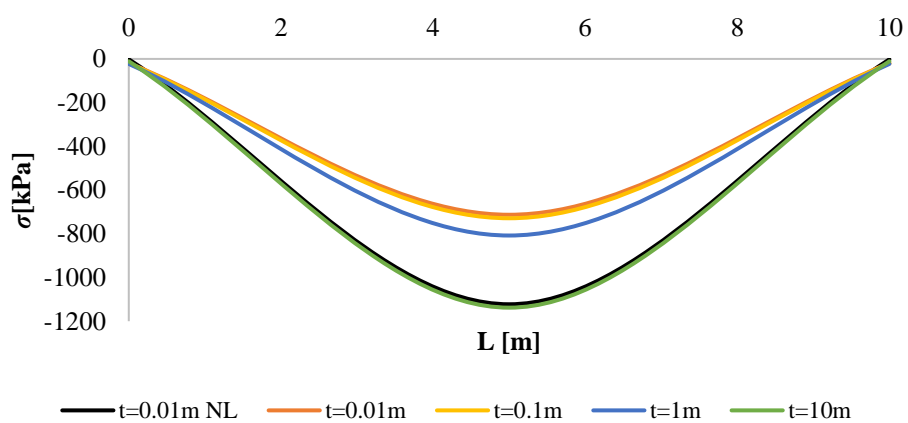


Figura A3.10 – Tensões nos nós da fibra superior da viga

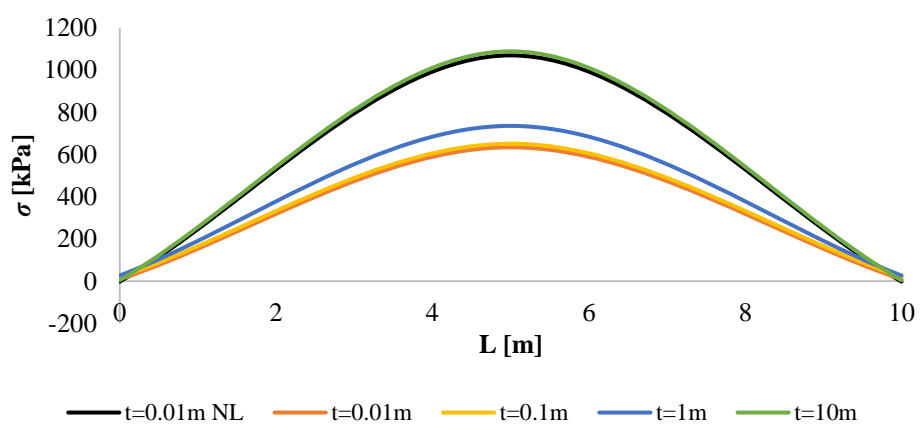


Figura A3.11 – Tensões nos nós na fibra inferior da viga

Nas Figuras A3.12 e A3.13 são apresentadas as tensões segundo x nos elementos no alinhamento dos nós representados na Figura A3.9, na fibra superior da viga e na fibra inferior da viga, respetivamente, para as diferentes hipóteses de rigidez adotadas. Apresenta-se ainda a hipótese de comportamento não linear da interface de ligação (NL).

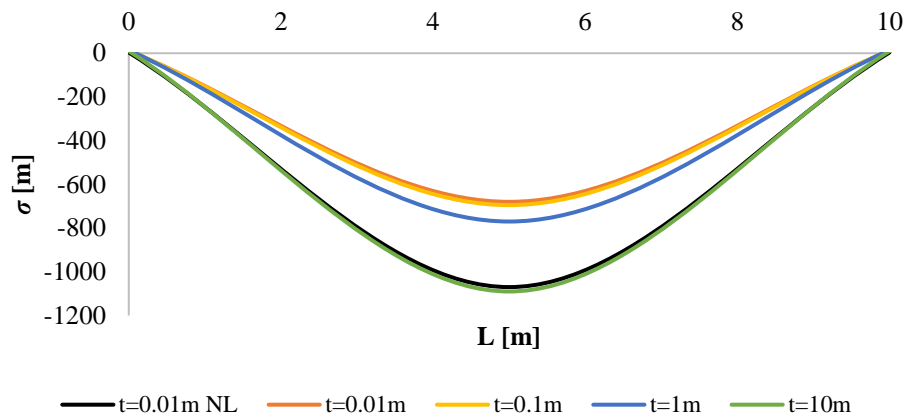


Figura A3.12 – Tensões nos elementos na fibra superior da viga

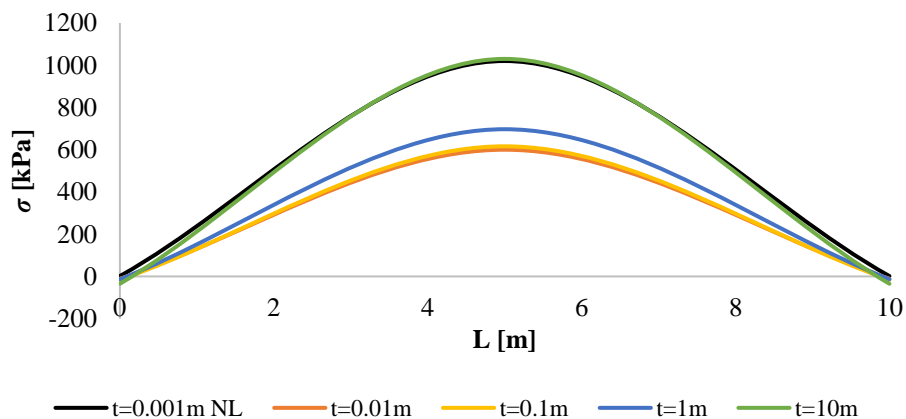


Figura A3.13 – Tensões nos elementos na fibra inferior da viga

Na Figura A3.15 são apresentadas as tensões normais na interface esquerda do pórtico, no alinhamento dos nós representados na Figura A3.14, para as diferentes rigidezes adotadas. As tensões na outra interface são simétricas, atendendo à simetria da estrutura, das condições de apoio e do carregamento aplicado.

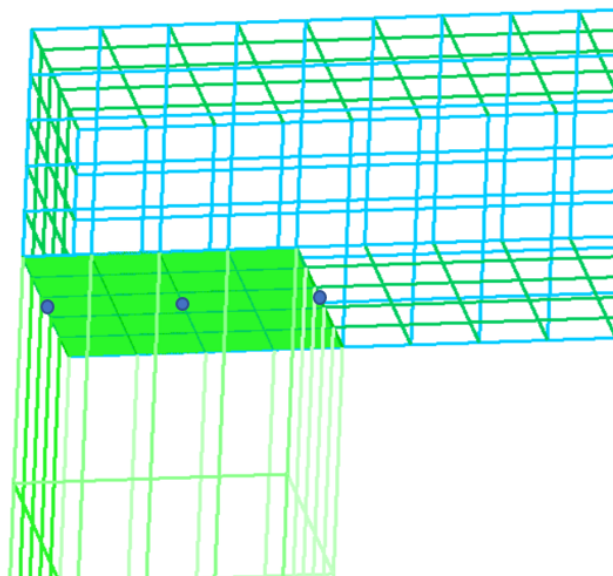


Figura A3.14 – Interface esquerda do pórtico

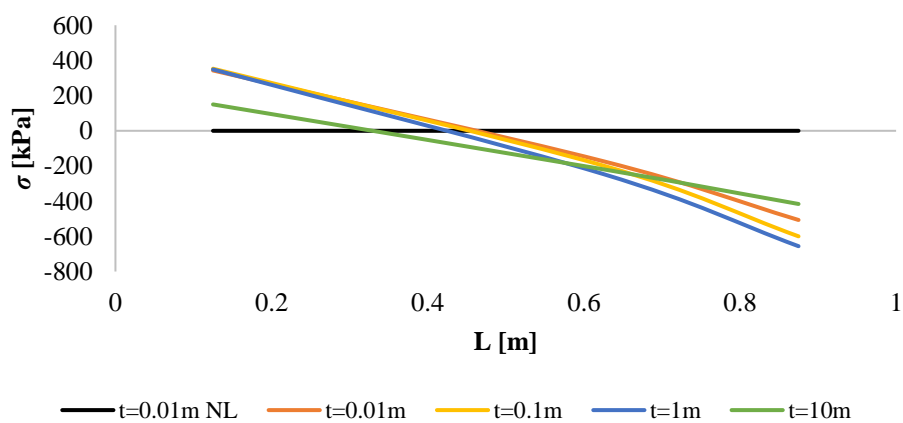


Figura A3.15 – Tensões nos elementos de interface

Na Figura A3.16 é apresentado o campo de tensões na viga segundo o eixo x , para as diferentes espessuras fictícias adotadas.

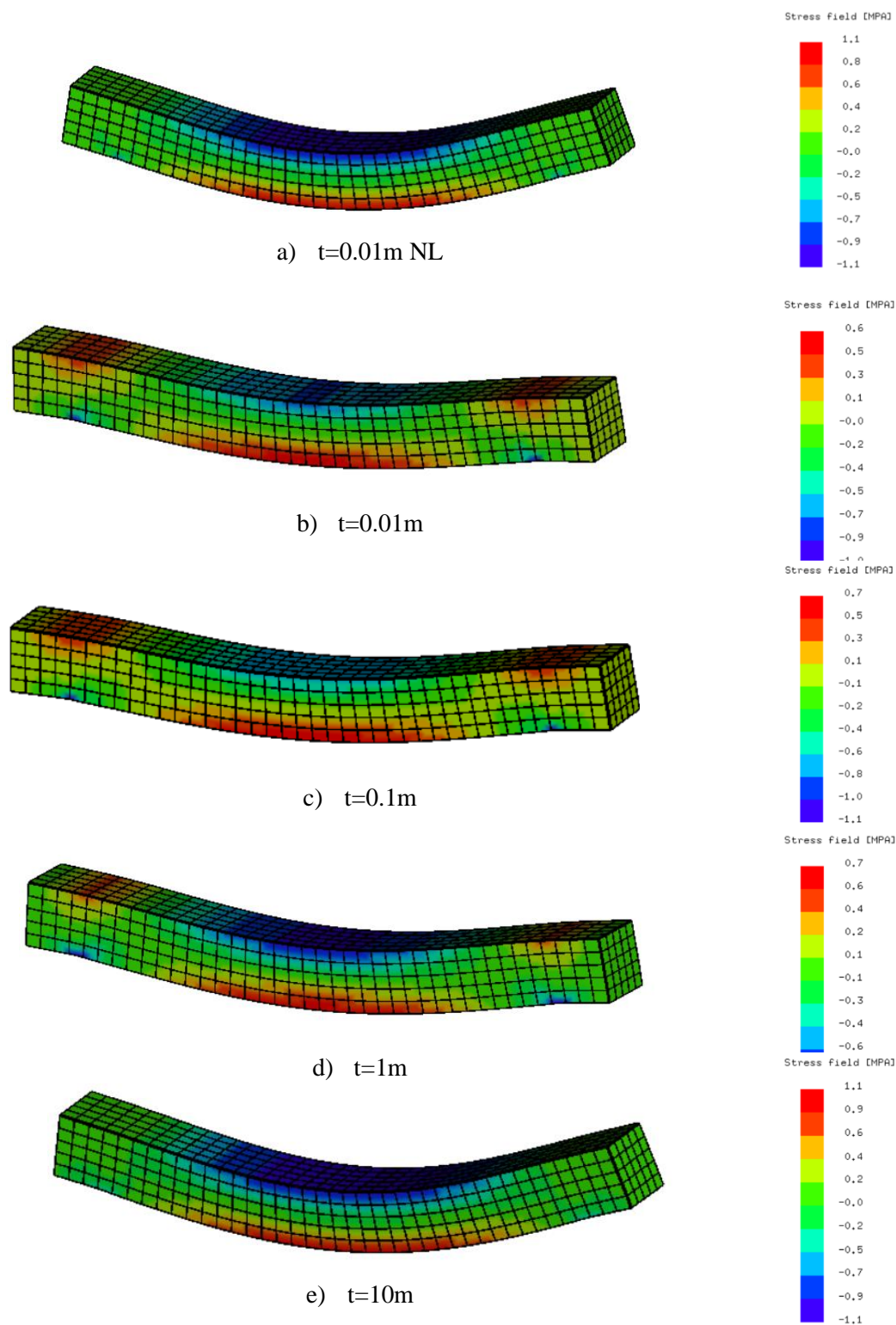


Figura A3.16 – Campo de tensões na viga segundo o eixo x

Na Tabela A3.7 são apresentadas as tensões a meio vão da viga, obtidas através da análise do programa para as diferentes hipóteses de rigidez, assim como as tensões teóricas para uma viga

simplesmente apoiada e uma viga encastrada em ambas as extremidades. A situação para uma interface com rigidez elevada aproxima-se do comportamento de uma viga encastrada e para uma interface com rigidez baixa ou comportamento não linear a resposta do modelo aproxima-se de uma viga simplesmente apoiada.

Comparando os resultados obtidos através do programa com a solução analítica, conclui-se que, quanto maior for a espessura fictícia do elemento de interface, menor será a rigidez do mesmo, e, por isso, a viga apresentará um comportamento mais próximo de uma viga simplesmente apoiada. Por sua vez, quanto menor for a espessura fictícia do elemento de interface, maior será a rigidez desse elemento, apresentando, portanto, um comportamento mais próximo de uma viga encastrada em ambas as extremidades.

Tabela A3.7 – Tensões a meio vão da viga

			Tensão [kPa]	
			Fibra superior	Fibra inferior
Parmac3d-Fflow	t [mm]	0.01 NL	-1123	1069
		0.01	-713	633
		0.1	-729	650
		1	-808	735
		10	-1138	1088
		100	-1477	1456
Solução analítica		Encastrado	650	650
		apoiado	-1950	1950

Na Figura A3.17 são apresentados os deslocamentos da viga segundo y, para as diferentes hipóteses de rigidez adotadas.

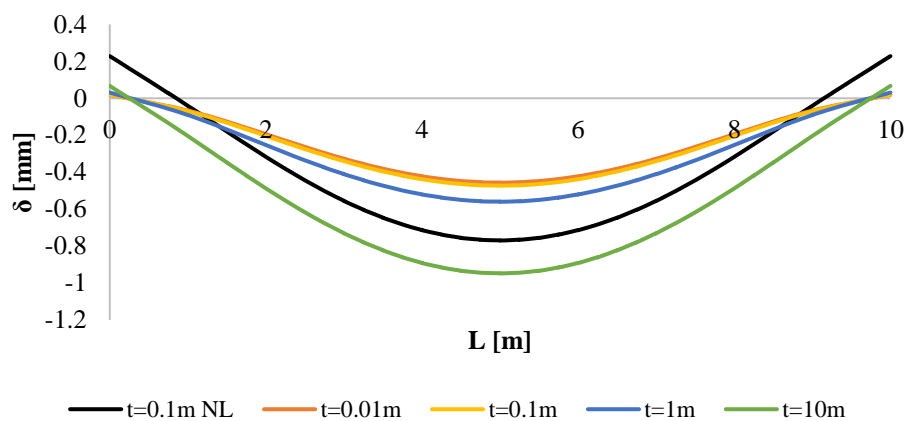


Figura A3.17 – Deslocamentos da viga segundo y

Na Tabela A3.8 são apresentados os deslocamentos a meio vão da viga, obtidos através da análise do programa para as diferentes hipóteses de rigidez, assim como os deslocamentos teóricos para as situações de viga simplesmente apoiada e de viga encastrada em ambas as extremidades

Tabela A3.8 – Deslocamentos a meio vão da viga

			Deslocamento [mm]
Parmac3d- Fflow	t [mm]	0.01 NL	0.77
		0.01	0.457
		0.1	0.473
		1	0.56
		10	0.948
		100	1.7
Solução analítica		Encastrado	0.406
		apoiado	2.031

Análise hidrostática

Depois de adotadas as geometrias da barragem gravidade de paramento vertical e inclinado considerada no Capítulo 4, foi realizada uma análise hidrostática com o intuito de mostrar a importância da introdução do coeficiente de penalização e da utilização dos elementos V_1 e V_{1_edm} .

Foram adotadas as malhas regulares das Figuras 4.2 e 4.16 para a barragem gravidade de paramento vertical e inclinado, respectivamente. Nas Figuras A3.18 e A3.19 são apresentados os campos de tensões segundo o eixo y (vertical) para as malhas regulares mencionadas previamente, constituídas por elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm} .

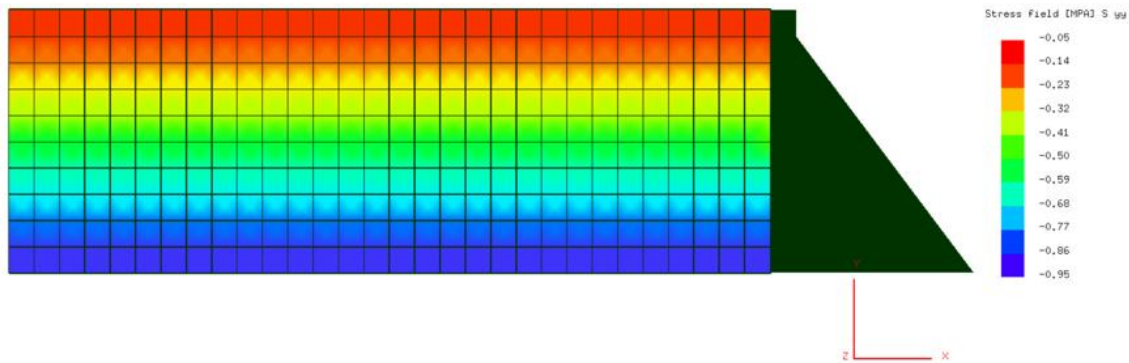


Figura A3.18 - Campo de tensões para uma análise hidrostática de uma barragem gravidade de paramento vertical com uma malha regular de elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}

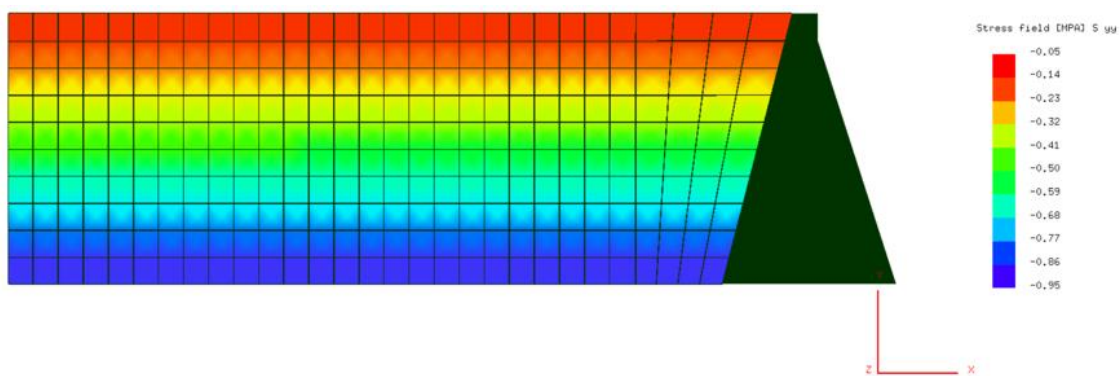


Figura A3.19 - Campo de tensões para uma análise hidrostática de uma barragem gravidade de paramento inclinado com uma malha regular de elementos V_1 , V_2 , V_{1_edm} e V_{2_edm}

Observa-se que, para uma malha regular, todos os elementos analisados apresentam resultados idênticos e satisfatórios. Foi ainda efetuado um estudo com as malhas regulares das Figuras 4.5 e 4.18, para barragens gravidade de paramento vertical e inclinado, respetivamente. Contudo, neste caso, só foi possível obter os campos de tensões para os elementos V_1 e V_{1_edm} , os quais se representam nas Figuras A3.20 e A3.21.

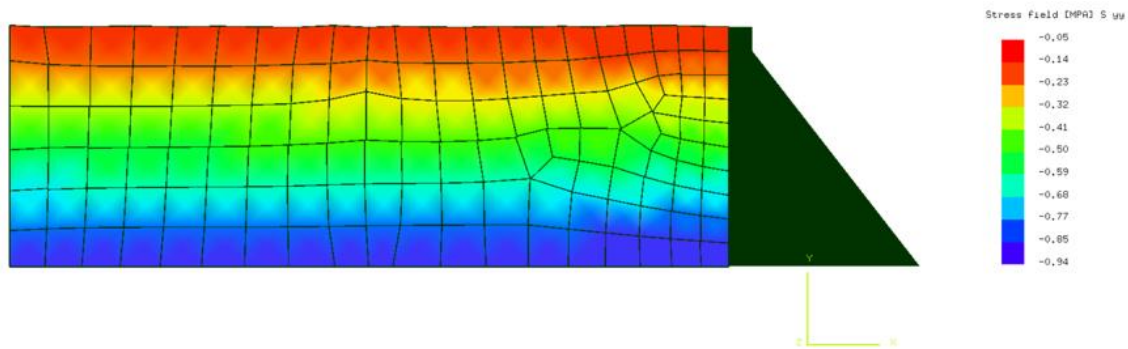


Figura A3.20 - Campo de tensões de uma análise hidrostática de uma barragem gravidade de paramento vertical com uma malha irregular de elementos V_1 e V_{1_edm}

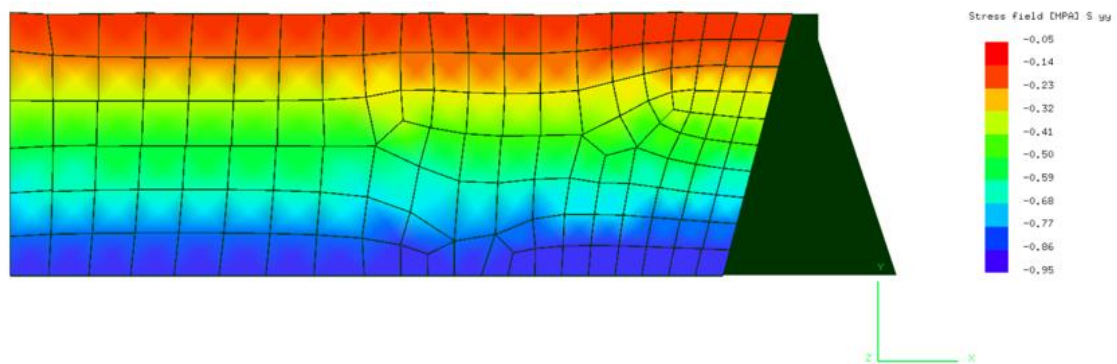


Figura A3.21 - Campo de tensões de uma análise hidrostática de uma barragem gravidade de paramento inclinado com uma malha irregular de elementos V_1 e V_{1_edm}

Para os elementos V_2 e V_{2_edm} , o programa não conseguiu atingir uma solução estática. Tal deve-se à distorção dos elementos e à rotação imposta aos mesmos. Assim, este estudo ilustra a importância da adoção de coeficientes de penalização (molas que impedem a rotação dos elementos).